



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Perttu Tavia

MAANALAISEN PYSÄKÖINTILAITOKSEN VÄLIPOHJAN TEKNIS-  
TALOUDELLINEN VAIHTOEHTOVERTAILU

Diplomityö

Tarkastajat: professori Kalle Kähkönen ja tohtorikoulutettava Anssi Koskenvesa. Tarkastajat ja aihe hyväksytty Rakentamisen ja talouden tiedekuntaneuvoston kokouksessa 4. toukokuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**PERTTU TAVIA:** Maanalaisen pysäköintilaitoksen välipohjan teknis-taloudellinen vaihtoehtoverailu

Diplomityö, 72 sivua, 6 sivua

Toukokuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennustuotanto

Tarkastajat: professori Kalle Kähkönen ja tohtorikoulutettava Anssi Koskenvesa

Avainsanat: pysäköintilaitos, välipohja, kustannuslaskenta, vaihtoehtoverailu

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää löytyykö paikallavaletulle jälkijännitetylle välipohjalle teknis-taloudellista kilpailijaa maanalaisessa pysäköintilaitoksessa. Tutkimus tehtiin Lemminkäinen Infra Oy:n toimeksiannosta. Tutkimuksessa haettiin argumentteja niihin väittämiin, joiden mukaan elementtirakenne on paikallavalurakennetta halvempi ja nopeampi tapa rakentaa välipohja maanalaiseen pysäköintilaitokseen. Kirjallisuudessa käytiin läpi suunnitteluprosessia sekä mahdollisia rakenteita maanalaiseen pysäköintilaitokseen. Vaihtoehtoja oli lukuisia ja niistä parhaimmat pyrittiin ottamaan tutkimukseen mukaan.

Vertailukohteena toimi P-Hämpin pysäköintilaitos. Välipohja on suunniteltu jälkijännitettyinä paikallavalurakenteena. Tutkimuksessa teetettiin viidet vaihtoehtoiset suunnitelmat vertailukohteeseen. Ruukki Construction ja Parma Oy tekivät suunnitelmat omista ratkaisistaan. Lisäksi opiskelijatyönä teetettiin kolme eri vaihtoehtoa. Vertailurakenteesta ja vaihtoehtoisista rakenteista tehtiin aikataulut ja laskettiin kustannukset samoilla periaatteilla. Työsaavutusten arvioinnissa käytettiin Ratu-työmenekkejä. Kustannuslaskelmat tehtiin soveltaen Talo 80-nimikkeistöjärjestelmää, jossa kustannukset laskettiin panospohjaisena suoritelaskentana. Työmaan käyttö- ja yhteiskustannuksia ei laskettu erikseen, mutta kustannuksissa otettiin huomioon aikasidonnaisten kustannusten muutokset rakennusajan pituuden mukaan. Vertailussa käytettiin apuna myös QSE-analyysiä ja tarkasteltiin eri rakenteiden häiriöherkkyyksiä sekä tehtiin herkkyystarkastelu. Hintatiedot saatiin Lemminkäinen konsernin vuosisopimuksista ja yhteistyöyrittäjiltä. Kustannuslaskelmien yksityiskohtaiset tiedot ovat liikesalaisuuksia, joten niitä ei tutkimuksessa esitetä.

Tutkimuksen tavoitteenasetteluun saatiin vastauksia. Kaikki vaihtoehtoiset rakenneratkaisut ovat vertailurakennetta kalliimpia rakennusteknisiltä kustannuksilta. Lyhyemmän rakennusajan johdosta Parma Oy:n vaihtoehto on kokonaistaloudellisesti vertailurakennetta hieman halvempi. QSE-analyysin tulokset eivät vaihtoehtoisilla rakenteilla ole vertailurakenteen tasoa. Suurimmat ongelmat elementtirakenteisilla vaihtoehdoilla on suurten ja raskaiden elementtien työmaalogistiikka. Uuden rakenteen käyttöönotto on parhaiten toteutettavissa kvr-hankkeessa, jossa urakoitsija pääsee jo suunnittelun alkuvaiheessa vaikuttamaan ratkaisuihin. Normaalissa urakkamuodossa suunnitelmaratkaisut on tehty jo ennen urakkatarjouskilpailua, eikä suunnitelmien muuttaminen ole enää helppoa.

## ABSTRACT

**PERTTU TAVIA:** Technical and economical option comparison for intermediate floor in underground parking facility  
 Tampere University of Technology  
 Master of Science Thesis, 72 pages, 6 Appendix pages  
 June 2016  
 Master's Degree Programme in Civil Engineering  
 Major: Construction production  
 Examiner: Professor Kalle Kähkönen and Doctoral Student Anssi Koskenvesa

**Keywords:** car park, intermediate floor, cost calculation, option comparison

The aim of this study was to examine are there any technical and economic competitors for cast in-situ post-tensioned intermediate floor in the underground car park construction. The study was conducted on Lemminkäinen Infra Oy's mandate. The study sought to find arguments to the claim that the prefabricated structure is cheaper and faster way to build an intermediate floor in an underground parking facility than in-situ structure is. Literature section went through the planning process, as well as possible structures for the underground facility. The options are numerous, and the aim was to research the best options.

P-Hämmppi underground parking facility is the reference project in the study. The intermediate floor is designed and build as post-tensioned cast in situ structure. Five sets of alternative scenarios were designed for the study. Ruukki Construction and Parma Oy made plans for their own solutions. Three different scenarios were made by a student as his thesis. The thicknesses of structures were kept close to the reference structure dimensions. Schedule and cost calculations were made equally. Ratu-files were used in the evaluation of work achievements. Cost calculations were made by applying the talo80- nomenclature system where the costs were calculated as batch-based-on performance calculation. The construction project's operation and overall costs were not calculated separately for each option. However, time-sensitive costs were taken into account as the time of construction varies between the different structures. In the comparison was also used QSE-analysis and the review the various structures disturbance sensitivity and sensitivity analysis. Price information was obtained from Lemminkäinen Oy's annual contracts and from partner companies of this study. Cost calculation details are trade secrets so they are not shown in the study.

The objectives set out in the study were met. The alternative structural solutions are more expensive in comparison with the reference structure. Parma Oy's structure was found to be little cheaper in total due to shorter construction time. None of the alternative structures achieve as good result of the QSE-analysis as reference structure. The biggest problems with alternative structures are that the prefabricated elements are large and heavy thus creating challenges in site logistics. Design and build contract is the easiest way to implement introduction of the new structure. Providing alternatives for the client's design in current fast tracked construction is a true challenge.

## ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Lemminkäinen Infra Oy:n toimeksiannosta Helsingissä Lemminkäisen pääkonttorissa Salmisaassa.

Työni valvomisesta ja ohjaamisesta sekä innostavasta asenteesta työtäni kohtaan haluan kiittää tutkija Anssi Koskenvesaa Tampereen teknillisestä yliopistosta ja Vesa Noutiaa Lemminkäinen Infra Oy:stä.

Lemminkäinen Infra Oy:stä haluan kiittää myös pääkonttorin reipasta ilmapiiriä ja työmaalta saamastani avusta Sami Eskelistä.

Tuesta, kannustuksesta ja kärsivällisyydestä haluan kiittää myös lähimmäisiäni, ystäviäni ja erityisesti rakasta puolisoani Minttua.

Espoossa 19.5.2016

Perttu Tavia



# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta.....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet.....	2
1.3	Tutkimuksen rajaukset .....	3
1.4	Tutkimuksen suoritus.....	3
1.5	Tutkimuksen tuotokset.....	4
2	PYSÄKÖINTILAITOKSEN RAKENNESUUNNITTELUPROSESSI .....	5
2.1	Suunnittelusta yleisesti.....	5
2.1.1	Suunnittelun lähtökohdat ja tavoitteet .....	5
2.1.2	Käyttöikäsuunnittelu .....	6
2.1.3	Paloturvallisuus .....	6
2.1.4	Tilamitoitus .....	7
2.1.5	Liittorakenne .....	8
2.2	Paikallavalurakenteet .....	9
2.2.1	Tausta.....	9
2.2.2	Hyödyt ja haitat .....	10
2.2.3	Yleisimmät rakenteet .....	11
2.3	Betonielementtirakenteet.....	13
2.3.1	Tausta.....	13
2.3.2	Hyödyt ja haitat .....	14
2.3.3	Yleisimmät betonielementtipalkkirakenteet.....	15
2.3.4	Yleisimmät betonielementtilaattaratkaisut.....	17
2.4	Teräsrakenteet.....	20
2.4.1	Tausta.....	20
2.4.2	Hyödyt ja haitat .....	20
2.4.3	Yleisimmät ratkaisut .....	20
2.5	Case P-Hämpi .....	22
2.5.1	Vaihtoehtoisten suunnitelmien yleiset lähtötiedot.....	22
2.5.2	Tekniset lähtötiedot .....	23
2.5.3	Valintakriteerit.....	24
3	TALOUDELLISET JA AJALLISET LASKELMAT .....	25

3.1	Kustannuslaskennan menettelyt .....	25
3.1.1	Kustannusten muodostuminen ja kustannuslajit .....	26
3.1.2	Suoritelaskenta .....	27
3.1.3	Tutkimuksessa käytetty kustannuslaskentamenettely.....	28
3.2	Ajalliset vertailulaskelmat.....	29
3.2.1	Yleistä .....	29
3.2.2	Kohteen määrälaskenta ja tehtäväluettelon laatiminen.....	29
3.2.3	Tehtävien mitoitus ja tahdistus.....	30
3.2.4	Yksittäisen tehtävän aikataulun laadinta.....	30
3.2.5	Tehtävien väliset riippuvuudet .....	31
3.2.6	Tehtävien ajoitus ja resurssien tasaus .....	31
4	QSE-ANALYYSI .....	33
4.1	QSE-analyysin osat.....	33
4.2	QSE-analyysin osatekijät .....	34
5	CASE P-HÄMPPI.....	35
5.1	Hankekuvaus .....	35
5.2	Vertailurakenne ja vaihtoehtoratkaisut .....	37
5.2.1	Vertailurakenne: jälkijännitetty paikallavalettu palkki-laattarakenne .....	38
5.2.2	VE1: Jännitetty teräsbetonipalkki – ripalaatta (Parma Oy) .....	39
5.2.3	VE2: Teräspalkki – jälkijännitetty liittolevyalaatta (Ruukki Construction).....	40
5.2.4	VE3: Jännitetty teräsbetonipalkki – ontelolaatta.....	41
5.2.5	VE4: Jännitetty teräsbetonipalkki – TT-laatta .....	42
5.2.6	VE5: Teräspalkki – kuorilaatta, liittorakenteena.....	43
6	RATKAISUIDEN VERTAILU.....	45
6.1	Vertailun lähtökohdat.....	45
6.1.1	Aika- ja kustannusvertailut .....	45
6.1.2	QSE-vertailu.....	46
6.2	Vertailut .....	46
6.2.1	Vertailurakenne: Jälkijännitetty paikallavalettu palkki-laattarakenne.....	46
6.2.2	VE1: Jännitetty teräsbetonipalkki – ripalaatta (Parma Oy) .....	48
6.2.1	VE2: Teräspalkki – jälkijännitetty liittolevyalaatta (Ruukki Construction).....	50
6.2.2	VE3: Jännitetty teräsbetonipalkki – ontelolaatta.....	53
6.2.3	VE4: Jännitetty teräsbetonipalkki – TT-laatta .....	55
6.2.4	VE5:Teräspalkki–kuorilaatta, liittorakenteena.....	57

6.2.5	Herkkyystarkastelu .....	59
7	TULOKSET.....	61
7.1	Ajallisten ja taloudellisten tulosten vertailu.....	61
7.2	QSE- tulosten vertailu.....	63
7.3	Herkkyystarkastelun ja tuotannon häiriöherkkyyden tulokset.....	64
8	POHDINTA.....	65
9	YHTEENVETO.....	68
	LÄHTEET.....	70

LIITE A: VERTAILURAKENNE: PAIKALLAVALETTU

LIITE B: VAIHTOEHTO 1 PARMA

LIITE C: VAIHTOEHTO 2 RUUKKI

LIITE D: VAIHTOEHTO 3 ONTELOLAATTA

LIITE E: VAIHTOEHTO 4 TT-LAATTA

LIITE F: VAIHTOEHTO 5 KUORILAATTA

## KUVALUETTELO

Kuva 1. Tutkimuksen tavoitteet.....	2
Kuva 2. Jälkijännitetty paikallavalurakenne (Aho et al. 2005). ....	11
Kuva 3. Tasavahva pilarilaatta. (RT-kortti). ....	11
Kuva 4. Sienilaatalla vahvistettu pilarilaatta (RT-kortti).....	12
Kuva 5. Kuppilaatta (RT-kortti). ....	12
Kuva 6. Ripalaatasto (RT-kortti). ....	13
Kuva 7. Havainnekuva palkkien ja laattojen asemoinnista (Toriseva).....	14
Kuva 8. Suorakaidepalkin suosituskoot (www.elementtisuunnittelu.fi).....	15
Kuva 9. Esijännitetty teräsbetonipalkki (Toriseva). ....	16
Kuva 10. Leukapalkkien suositusmitat (RT-kortit). ....	17
Kuva 11. Tyypillisimmät ontelolaatat (www.elementtisuunnittelu.fi). ....	18
Kuva 12. TT- laatta (www.elementtisuunnittelu.fi). ....	18
Kuva 13. Kuorilaatta (www.elementtisuunnittelu.fi). ....	19
Kuva 14. Havainnekuva ripalaatasta (Parma Oy) ....	19
Kuva 15. Teräspalkki ja ontelolaatta liittorakenteena (Corus s.10).....	21
Kuva 17. Teräspalkki ja kuorilaatta pintavalulla (Corus s.12).....	22
Kuva 18. Tutkittava alue pysäköintilaitoksessa (A-Insinöörit).....	23
Kuva 19. Kustannusten aiheutuminen (Kivistö 2012). ....	27
Kuva 20. Suoritteen yksikkökustannus (Kivistö 2012.) ....	28
Kuva 21. Kokonaistyömenekin tarkistaminen (Koskenvesa et al. 2010, s. 11).....	31
Kuva 22. Kokonaiskeston määrittäminen (Koskenvesa et al. 2010, s. 11).....	31
Kuva 23. Havainnekuva pysäköintilaitoksesta (huoneluettelo, ark-kuva).....	35
Kuva 24. Pysäköintilaitoksen yhteyksien sijainti (www.finnpark.fi). ....	36
Kuva 25. Poikkileikkauskuva tutkittavasta kohdasta (A-Insinöörit).....	37
Kuva 26. Vertailurakenteen leikkauskuva keskipilarilinjalta.....	38
Kuva 27. VE 1:n leikkauskuva keskipilarilinjalta. ....	39
Kuva 28. VE2:n leikkauskuva keskipilarilinjalta. ....	41
Kuva 29. VE3:n leikkauskuva keskipilarilinjalta. ....	42
Kuva 30. VE4:n leikkauskuva keskipilarilinjalta. ....	43
Kuva 31. VE5:n leikkauskuva keskipilarilinjalta. ....	44

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Lähes poikkeuksetta kaikki maanalaisiin pysäköintilaitoksiin tehtävät välipohjat rakennetaan jälkijännitettynä paikallavalurakenteina. Markkinoilla ei ole montaa jälkijännitettyjä paikallavalurakenteita tekeviä yrityksiä, mikä voi pitää hintatason suhteellisen korkeana.

Paikallavalettu rakenne jälkijännitettynä saa aikaan matalan rakennekorkeuden ja rakenteen pitkäaikaiskestävyyden kannalta hyvän lopputuloksen. Pysäköintilaitoksissa, joissa lattia jätetään betonipintaiseksi, paikallavalun etuna on se, että pinnasta saadaan kerralla valmis eikä erillistä pintavalua tarvita. Jännittämisellä pyritään halkeilemattomaan ja tiiviiseen rakenteeseen, sillä teräsbetonirakenteen tiiviys vaikuttaa oleellisesti rakenteen käyttöikään. Paikallavalettu betonirunko on kuitenkin usein rakennusprojektin aikataulua hidastava tekijä. Liittorakenteisen ja paikallavalurungon tuotantotekniikka koostuu pääasiassa neljästä tehtävästä, joita ovat valmistusosien asennus-, muotti- ja tuentatyö, työmaaraudoitus, betonointi ja tuennan purku. Työnaikainen tuenta paitsi aiheuttaa yhden työvaiheen lisää, se myös estää seuraavan työvaiheen aloittamisen valettavan kohdan alapuolella ennen tuennan purkamista ja näin hidastaa rakentamista. (Horko 2010, s.6.)

Suomessa on toteutettu parkkiluolissa vain muutamia välipohjaratkaisuja elementtirakenteina tai muina rakenteina, joten vaihtoehtoiset rakenteet on syytä tutkia mahdollisten kustannussäästöjen ja ajallisen hyödyn kannalta. Vaihtoehtoisena rakenteena elementtirakenne tuo etua aikataulullisesti ja mahdollisesti myös kustannuksissa, mutta toisaalta logistiset ongelmat ja nostokaluston rajallisuus asettavat maan alla rakentamiselle rajoitteita. Toisaalta monet tekijät, jotka vaikuttavat rakenteiden työstettävyyteen ja soveltuvuuteen maanpäällisissä pysäköintilaitoksissa, eivät ole niin merkittävässä roolissa maanalaisissa pysäköintilaitoksissa. Maanpäällisissä pysäköintilaitoksissa vesi ja suolat ovat ongelmallisia betonin säilyvyyden kannalta, varsinkin elementtiratkaisuiden osalta. Toisaalta maanalaisissa tiloissa nämä seikat eivät ole niin tärkeässä roolissa. Maan alla rakennettaessa ympäristötekijät ja sääolosuhteet eivät aseta haasteita paikallavalamiselle, kun maan päällä rakennettaessa voivat olla häirtätekijöitä.

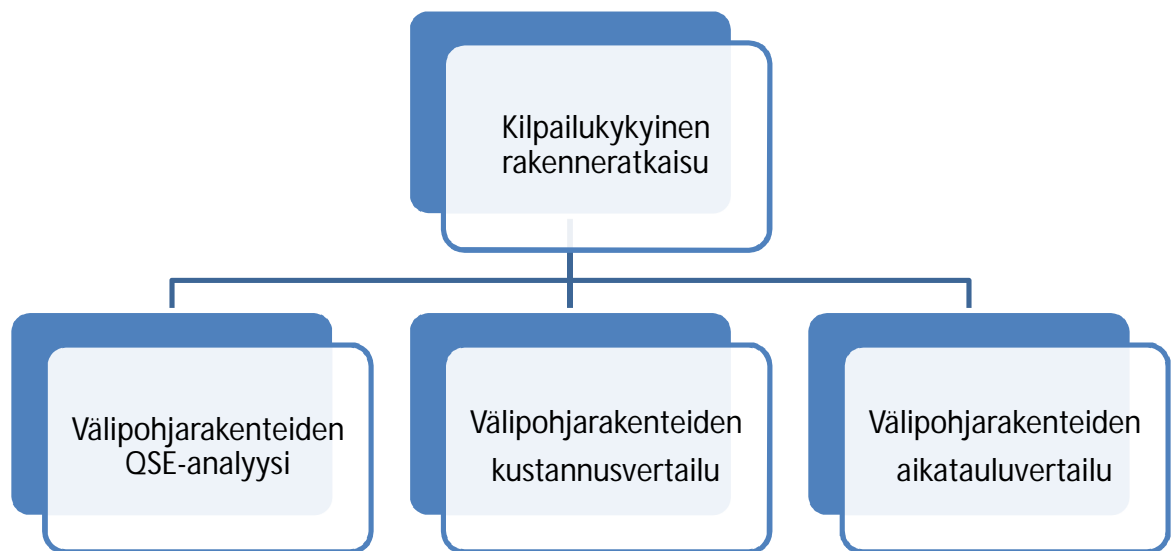
Elementtirakenteiden määrän vähyyteen pysäköintilaitoksissa vaikuttaa suuresti tilaajien ja suunnittelijoiden negatiiviset mielikuvat niitä kohtaan, sekä paikallavalurakentamisen asema vallitsevana rakentamistapana.

Tämä tutkimus tehdään Lemminkäinen Infra Oy:n toimeksiannosta. Aiheesta on tehty ammattikorkeakouluopiskelijoiden (Mustonen & Suomalainen, 2011) opinnäytetyö *Kal-*

*liotilan paikallavaluelementtiholvin teknis-taloudellinen vertailu.* Edellä mainittu opin- näytetyö ja Lemminkäinen Infra Oy:n halu selvittää tarkemmin vaihtoehtoisten raken- teiden kilpailukyky loivat pohjan tarkemmalle tarkastelulle. Aikaisempi karkea tarkaste- lu antoi viitteitä, että vaihtoehtoiset ratkaisut ovat taloudellisesti kannattavia. Lisäksi Kari Kuittisen (1987) diplomityön *Pysäköintitalojen taloudellinen suunnittelu ja tuotan- totekniiikka* tulokset osoittavat, että elementtitekniikalla toteutetut pysäköintitalot ovat käyttökelpoisia sekä merkittävästi halvempia kuin paikallavaluekniiikalla toteutetut. Teräsrunkoiset järjestelmät olivat Kuittisen diplomityön tekemisen aikaan vielä selvästi muita runkojärjestelmiä kalliimpia.

## 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää löytyykö paikallavaluelementtelmälle taloudellisesti ja aikataulullisesti kilpailukykyinen vaihtoehto maanalaisessa pysäköintilaitoksessa. Vaihtoehtoisista rakenneratkaisuista lasketaan panos- ja kustannuslajien mukaan kus- tannusarviot ja laaditaan tehtäväaikataulut, joita verrataan nykyiseen jälkijännitettyyn rakenneratkaisun kustannusarvioon ja aikatauluun. Tutkimuksessa selvitetään myös eri rakenteiden soveltuvuutta maanalaiseen pysäköintilaitokseen QSE-analyysin avulla. Tutkimuksen tavoitteet on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Tutkimuksen tavoitteet.

Tutkimuksessa haetaan argumentteja väittämiin, joiden mukaan elementtirakenne on paikallavalueurakennetta halvempi ja nopeampi tapa rakentaa välipohja maanalaiseen py- säköintilaitokseen.

### 1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa verrataan vaihtoehtoisia välipohjaratkaisuja paikallavalumenetelmällä tehtyyn jälkijännitettyyn betonivälipohjaan. Tutkimuksen vertailukohteena on Tampereen Hämeenkadun alle kallion sisään rakennettava P-Hämpin pysäköintilaitos, joka valmistui loppuvuonna 2012. Kohteessa on kiinnitetty erityistä huomiota arkkitehtoniiseen ilmeeseen ja tilantunteeseen, muun muassa jalankulkijat on erityisesti huomioitu suunnitteluratkaisuissa. Tutkimuksen vertailuosuudessa käytettävien suunnitelmien tarkkuus on tarjouslaskentapiirustusten tasolla.

Tutkimus rajataan koskemaan parkkihallin lohkoja 1 - 3, mikä käsittää noin neljäsosan koko hankkeen välipohjan pinta-alasta. Tutkittava osuus sijoittuu parkkihallin läntiseen pätyyn ja välipohja rajoittuu tällä osuudella koko kallioprofiilin leveydelle. Kyseisessä kohdassa pysäköiminen on puolitoistalaivainen, eli pysäköintiruutuja on kolme parkkiriiviä rinnakkain.

Pysäköintilaitoksen koko välipohja-alaa ei katsottu tarkoituksenmukaiseksi ottaa mukaan tarkasteluun, vaan mukaan valittiin kohta, joka kuvaa parhaiten yleistä ratkaisua kohteessa esimerkiksi liittymien osalta. Vertailu tehdään pyrkien pitämään kiinni tämän hetkisistä suunnittelun asettamista reunaehdoista. Jännevälit pidetään kuitenkin suunnitelmien mukaisena, mutta rakenteiden paksuudet voivat vaihdella. Kustannuksissa otetaan huomioon pilarit ja välipohjalaatta palkkeineen. Mahdollisesta kallioprofiilin muutoksesta johtuvat kustannukset sekä muut muuttuvat tekijät, kuten sprinklereiden teho, otetaan huomioon kustannuksissa.

### 1.4 Tutkimuksen suoritus

Tutkimuksessa sovellettiin laskennallista tapaustutkimusta ja korrelaatiotutkimusta. Lähtötiedot ja vertailuaineisto saatiin P-Hämpä -projektin olemassa olevista suunnitelmista ja asiakirjoista. Lähtötietojen ja niiden asettamien reunaehtojen pohjalta teetettiin suunnitelmat vaihtoehtoisille rakenneratkaisuille.

Tutkimuksen aluksi selvitettiin rakenteet, jotka soveltuvat kohteen reunaehtoihin parhaiten. Vaihtoehtoja karsittaessa otettiin huomioon muun muassa rakenneratkaisuiden työtekniikat, kuljetettavuus, rakenteen paino, paksuus, vesitiiviys ja palotekniset ominaisuudet. Vaihtoehtoisten ratkaisuiden haluttiin myös eroavan riittävästi vertailurakenteesta. Kolme vaihtoehtoista suunnitelmaa kohteesta on tehnyt kandidaatintyönä Tuomas Toriseva Tampereen teknillisestä yliopistosta, suunnittelun ohjauksesta on vastannut yliopistonlehtori Olli Kerokoski. Yhteistyöyrityksinä mukana tutkimuksessa ovat Parma Oy ja Ruukki Construction. Molemmat yhteistyöyrityksistä ovat tehneet tutkimukseen ratkaisun omasta pysäköintilaitosjärjestelmästä. Yhteensä vaihtoehtorakenteita on viisi.

Vaihtoehtoisista rakenneratkaisuista ja vertailurakenteesta tehtiin kustannusarviot, aikataulut ja QSE-analyysi, jolloin eri ratkaisuja voidaan analysoida ja verrata toisiinsa samojen lähtökohtien ja periaatteiden mukaan. Aikataulut vaihtoehtoisille rakenteille tehdään Ratu-menekkejä soveltaen. Kustannuslaskelmat laskettiin Lemminkäinen Infra Oy:n sopimushintojen perusteella. Näin toimien eri ratkaisuja pystyttiin tarkastelemaan siten, että ne ovat keskenään vertailukelpoisia. Eri vaihtoehtojen kustannukset ja aikataulut suhteutettiin nykyiseen ratkaisuun siten, että vertailu vastaa koko pysäköintihallin välipohjan alaa. Vertailussa otettiin myös huomioon työmaan aikasidonnaisten kustannusten muutos rakennusajan muuttuessa. Lisäksi huomioitiin muut kustannuksiin vaikuttavat tekijät, kuten kallioprofiilin ja sprinklerijärjestelmän mahdolliset muutokset.

## **1.5 Tutkimuksen tuotokset**

Tutkimuksen keskeisinä tuotoksina saatiin välipohjaratkaisuista kustannuslaskelmat, aikatauluvertailu ja QSE-analyysi. Kustannusvertailuun tehtiin herkkyysanalyysi eri tekijöiden vaikutuksesta kokonaiskustannuksiin.

Tutkimuksen tuotoksena tulleista kustannuslaskelmista, aikatauluista ja QSE-analyysistä tehtiin johtopäätökset löytyykö vaihtoehtoisista rakenteista kilpailukykyistä vaihtoehtoa paikallavaletulle jälkijännitetylle välipohjarakenteelle. Suoritteiden yksikkökustannukset laskettiin panospohjaisesti, jolloin herkkyystarkastelu kustannusten osalta onnistui helposti.



## 2 PYSÄKÖINTILAITOKSEN RAKENNESUUNNITTELUPROSESSI

### 2.1 Suunnittelusta yleisesti

#### 2.1.1 Suunnittelun lähtökohdat ja tavoitteet

Maanalaisessa pysäköintilaitoksessa olosuhteet rakenteiden toimivuuden kannalta ovat maan päälliseen pysäköintilaitokseen verrattuna ihanteelliset. Maan päällä rakenteet ovat alttiita muuttuville sääolosuhteille ja lämpötilaeroille. Suuret lämpötilaerot sekä sadevedet yhdessä asettavat maanpäällisen pysäköintilaitoksen rakenteille runsaasti erilaisia rasituksia. Maan alla on tasainen lämpötila ympäri vuoden, eivätkä rakenteet ole sääolosuhteille alttiina. Lisäksi maanpäällisissä rakenteissa suolarasitukset ovat keskeisessä osassa, toisin kuin maanalaisissa pysäköintilaitoksissa, joihin suolan kulkeutuminen on vähäisempää. Näillä tekijöillä on merkittävä positiivinen vaikutus maanalaisen pysäköintilaitoksen rakenteiden säilyvyyteen.

Pysäköintilaitoksen välipohjan rakennesuunnittelussa tulee pyrkiä siihen, että laattarakenteessa on mahdollisimman vähän eri kerroksia ja mahdollisimman suuret yhtenäiset pinta-alat. Pintarakenteita, joiden alle vesi voi tunkeutua halkeamien tai muiden vauriokohtien kautta vältetään. Saumojen lukumäärä rajoitetaan mahdollisimman pieneksi. Itse saumarakenteina käytetään yksinkertaisia, hyviksi todettuja ratkaisuja. Pysäköintitasojen ja ajoluiskien yläpinnan hyvän tiiviyn saavuttamiseen kiinnitetään erityistä huomiota huolellisella työsuorituksella sekä käyttämällä mahdollisia pintaa tiivistäviä pinnoitteita, jolloin vähennetään oleellisesti pinnan pölyämistä sekä veden ja suolojen tunkeutumista betoniin. Vedenpoistojärjestelmä tulee suunnitella myös käytännössä toimivaksi, jolloin pysäköintitasojen kosteus- ja suolarasitus jää mahdollisimman pieneksi. (Mannonen 2008, s.84.)

Rakennesuunnittelun tulee lisäksi tyydyttää lujuuden, joustavuuden, kestävyys, helpon hoidon ja tulevien korjausten vaatimukset. Yhtä tärkeitä ominaisuuksia ovat myös toiminnallisuus, kustannukset, ulkomuoto ja käyttäjämukavuus. (Chrest et al. 2004, s. 417.)

Tyypillisimmät vauriot betonirakenteissa pysäköintilaitoksissa ovat vedeneristyksissä, kulutuskerroksessa, pintarakenteissa, liikuntasaumoissa ja pinnoitteissa, joten niihin on suunnitteluprosessissa kiinnitettävä erityistä huomiota. Pysäköintitasot tehdään nykyään yleisesti vedenpitäviksi rakentamalla ne vesitiiviistä betonista. Pintaan voidaan valaa betonista tiiviimpi kerros, jolla varmistetaan vedenpitävyys. Elementtilaatat ja niiden päälle valettu paksuhko raudoitettu pintalaatta ovat toimineet näkyvistä pintahalkeamista huolimatta yllättävän hyvin vettä pitävinä. Paikalla jännittäminen on taloudellinen menetelmä vesitiiveyden aikaansaamiseksi, jossa jännevoiman aiheuttama puristus pitää

halkeamat niin pieninä, että rakenne on vesitiivis. Vedenpoisto täytyy suunnitella huolellisesti, jotta autojen mukana ja rakenteiden pesusta tullut vesi pääsee poistumaan tasoilta riittävän nopeasti. (Pekkala 2003, s. 66-67.)

Pysäköintitalojen välitasojen vesitiiviys saavutetaan betonirakenteilla ilman erillistä vedeneristystä. Vesitiiviys perustuu teräsbetonisen pintalaatan vesitiiviyteen, pintabetonin jälkijännitykseen tai molemmissa suunnissa puristettuun laattaan. Yläkansien vedenpitävyys varmistetaan yleensä erillisellä vedeneristyskerroksella, ellei yläkantta ole varustettu katoksella. Kuitenkin kuorilaatta + paikallavaluratkaisussa erillinen vesieristys voidaan jättää pois, kun suunnittelussa ja toteutuksessa varmistetaan rakenteen säilyvyys betonirakenteiden säilyvyysohjeiden mukaisesti. Pysäköintitalot on jaettava suhteellisen pieniin liikuntasauma- alueisiin vesitiivistä pintalaattaa käytettäessä. Vedenpoisto tapahtuu tasojen ja pintalaatan kallistuksella. Vesikourut ja syöksytorvet sijoitetaan liikuntasaumojen yhteyteen. Varsinaiset kantavien rakenteiden kallistukset tehdään normaalisti kaltevuuteen 1:50 ja pintarakentein tehtävät vastakallistukset kaltevuuteen 1:100. (<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/pysakointilaitokset/print>.)

Perinteisesti pysäköintilaitosten rakenteissa käytetään runkomateriaaleina terästä, teräsbetonia ja niiden monenlaisia yhdistelmiä. Betoni voi olla sekä jännitettyä että raudoitettua. Terästä käytetään joko yksinään pääasiallisena rakenteena tai liittorakenteena betonin kanssa. (Kenward et al. 2002, s.44.)

### 2.1.2 Käyttöikäsuunnittelu

Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelussa käyttöikä on aikaisemmin ollut yleisesti 50 vuotta. Viime aikoina on käyttöikäsuunnitteluun kiinnitetty yhä enemmän huomiota. Nyt näköpiirissä on, että suunnittelukäyttöikää ollaan yleisesti nostamassa 100 jopa 200 vuoteen. Käyttöikäsuunnittelu toimii niin, että rakennuksen tilaaja valitsee rakennuksen tavoitekäyttöiän rakennuksen käyttötarkoituksen mukaan. Tavoitekäyttöiän perusteella suunnittelija määrittelee rakennuksen suunnittelukäyttöiän. Käyttöikämitoitusta tehdään kahdella periaatteella, yksinkertaisella taulukkomitoituksella tai laskennallisella mitoituksella. (Pukki 2004, s.39-40.)

### 2.1.3 Paloturvallisuus

Pysäköintilaitosten rakenteellinen paloturvallisuus on tärkeä ja merkityksellinen tekijä suunnitteluprosessissa. Se perustuu määräyksiin, jotka ovat saaneet myös kritiikkiä. Yleisin kritiikki on kohdistunut palomääräysten ja ohjeiden joskus tarpeettomana pidettyyn tiukkuuteen. Osa kritiikistä on ollut selvästi perusteltua ja osittain tämän johdosta ympäristöministeriö uusi jo vuonna 1990 autosuojien paloturvallisuutta koskevat ohjeet.

Sen jälkeen ohjeet uusittiin 1997 palosäädösten (E1) yleisen uudistuksen yhteydessä. Viimeisin ajanmukaistus tehtiin vuonna 2005, jolloin ohje saatettiin uusimman E1:n (2002) mukaiseksi. Paloturvallisuus on keskeisessä osassa pysäköintilaitoksen suunnittelussa. Paloturvallisuussuunnittelua ohjaa Suomen rakentamismääräyskokoelman osa *E1 Rakennusten paloturvallisuus määräykset ja ohjeet 2011* ja täydentävät ohjeet osassa *E4 Autosuojien paloturvallisuus ohjeet 2005*. Rakennuksen palotekninen luokka ja suojaustaso ovat merkittävimmät yksittäiset rakennuksen palotekniseen turvallisuustasoon vaikuttavista perustekijöistä. Palo-osastointi, savunpoisto ja poistuminen palon sattuessa ovat myös merkittäviä paloteknisen suunnittelun osa-alueita. Merkittävin seikka ajattelun pysäköintilaitoksen rakenteita on rakenteille asetettu palonkestoaika, mikä voi nousta kriittiseksi laskettaessa eri rakenteiden kustannuksia. Esimerkiksi teräsrakenteissa palonsuojaus voi olla merkittävä kustannuslisä. (Aarnio 2005, s.7-9.)

Rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan. Muut merkittävät vaatimukset koskevat henkilöturvallisuutta, palon leviämisen estämistä, palokunnan toiminnan turvaamista ja aineellisten vahinkojen minimoimista. Vaatimusten täyttäminen voidaan osoittaa kahdella eri menettelyllä (Suomen Rakentamismääräyskokoelma E1):

1. Paloturvallisuusvaatimuksen katsotaan täyttyvän, jos rakennus suunnitellaan ja rakennetaan perustuen oletettuun palonkehitykseen, joka kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet. Vaatimuksen tähtyminen todennetaan tapauskohtaisesti ottaen huomioon rakennuksen ominaisuudet ja käyttö.
2. Paloturvallisuusvaatimuksen katsotaan täyttyvän, jos rakennus suunnitellaan ja rakennetaan noudattaen Suomen rakentamismääräyskokoelman osan E1 määräysten ja ohjeiden paloluokkia ja lukuarvoja.

Toiminnallisessa palomitoituksessa huomioidaan rakennuksen yksilölliset ominaispiirteet sekä passiiviset, että aktiiviset palontorjuntamenetelmät rakenteiden paloturvallisuussuunnittelussa. Menetelmän käytöllä voidaan saavuttaa realistinen ymmärrys rakenteiden toiminnasta tulipalossa sekä varmistua rakenteiden kokonaisturvallisuudesta. Tämän edellytyksenä on riittävä varmuustaso tehdyistä oletetuista uhkakuvista ja sitä kautta palon aiheuttamista rasituksista rakenteille. (Outinen 2009.)

## 2.1.4 Tilamitoitus

Helppo ja turvallinen käytettävyys tarkoittaa sitä, että ajoväylät ja rampit ovat riittävän leveitä ja loivia. Parkkiruudun sisään tulee pystyä ajamaan kerralla. Pilarit tai muut rakenteet eivät saa kaventaa parkkiruutua tai estää näkyvyyttä. Tällä hetkellä käytössä oleva ajoväylään nähden kohtisuora henkilöauton parkkiruutu on yleensä 2,5 x 5 metriä,

mikä on juuri ja juuri riittävä työpaikka- ja asukaspysäköintiin. Julkisten tilojen ja myymälöiden pysäköintiruutujen tulisi olla 2,6 -2,7 metriä leveitä. Kohtisuoraan pysäköintiin perustuvassa järjestelmässä ajoväylän leveyden tulee olla 7 metriä. Sijoittamalla parkkiruudut vinoon kulmaan ajoväylään nähden lisääntyy käyttömukavuus. Samalla ajoväylää voidaan kaventaa noin 5,5 - 6 metriin. Vinopysäköinti edellyttää yleensä yksisuuntaista liikennöintiä. Pysäköintilaitoksen edullisin pohjamuoto on sekä pysäköinnin että rakenteiden kannalta useimmiten suorakaide. Pysäköintilaitoksen tasot tulisi aina kallistaa vähintään suhteessa 1:50. Henkilöautoille tarkoitetuissa pysäköintilaitoksissa tulee vapaan korkeuden olla 2,4 metriä. Kerroskorkeus on tällöin palkkivälistä ja hyötykuormasta riippuen 3 - 3,4 metriä. (Aho 2008, s.56.)

### 2.1.5 Liittorakenne

Liittorakenteella tarkoitetaan rakennetta, jossa esivalmisteinen osa, kuten betonielementti toimii yhdessä paikallavalun tai toisen betoni- tai teräselementin kanssa. Liittorakenteen perusajatus on eri rakenteiden optimaalinen käyttö. Liittopalkkirakenne muodostuu betonipalkista ja siihen tukeutuvista elementtilaatoista. Liittovaikutus aikaansaadään saumavalun sekä laattojen ja palkin välisten tartuntojen avulla, jolloin rakenne toimii T-muotoisena liittopalkkina. Palkin tehollinen korkeus kasvaa laatan ja mahdollisen pintabetonin paksuuden verran. Liittolaatalla tarkoitetaan betonielementtilaatan (TT-laatta, kuorilaatta, ontelolaatta tai ripalaatta) ja sen päälle tulevan paikallavalun muodostamaa kokonaisuutta. Kutakin rakennetta käytetään niissä rakenteen osissa, joissa sen ominaisuuksia voidaan tehokkaimmin ja taloudellisimmin käyttää. Perusperiaate on, että liittorakenteessa esivalmistettu osa kantaa oman painonsa lisäksi siihen liitettävien osien tai sen päälle valettavan betonin painon. Kun paikallavalu- ja saumavalubetoni ovat kovettuneet, niin esivalmistaiseen osaan liitetyt muut osat ja paikallavalu toimivat yhtenä kokonaisuutena valujen kovettumisen jälkeisille kuormille. Rakenteen toimiessa yhtenä liittorakenteena sen jäykkyys ja kantokyky on oleellisesti erillisiä rakennusosia suurempi. Liittopalkki on edullisimmillaan rakennusten välipohjissa, joissa hyötykuorman osuus on suuri ja rakennekorkeus halutaan minimoida. Pidemmillä jänneväleillä tai kun palkin pysyvä kuorma muodostaa suuren osan rakenteen kokonaiskuormasta, voidaan käyttää työnaikaista tuentaa.

(<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/liittorakenteet>, 13.4.2012.)

Liittorakenteessa yleisimmin käytettävät palkit ja laatat on käyty läpi alla olevissa osissa.

## 2.2 Paikallavalurakenteet

### 2.2.1 Tausta

Paikallavaletulla rakenteella tarkoitetaan koko välipohjarakenteen tekemistä paikallavalettuina. Tässä osiossa käydään läpi yleisimpiä paikallavalettuja rakenneratkaisuja. Paikallavalettuja ja muita tekniikoita voidaan käyttää yhdistelmärakenteina, esimerkiksi jännepalkkielementti ja paikallavalettu laatta, mutta tässä tutkimuksessa on katsottu tarkoituksenmukaiseksi käsitellä paikallavalettuja rakenteita sellaisenaan.

Paikallavalettu betoni on pysäköintilaitoksen rakenneratkaisuna ja materiaalina luonteva ja turvallinen. Oikein hyödynnettynä se on edullinen ja järkevä valinta ajatellen rakennuksen koko käyttöikää. Jälkijännitystekniikalla ja kehittyneellä betonitekniikalla voidaan rakenteelle taata hyvä pitkäaikaissäilyvyys. (Mannonen 2008, s.84.)

Tavanomaisella teräsbetonilla ei päästä yhtä pitkiin jänneväleihin kuin vastaavalla jänneväälillä ja kuormalla jännitetyillä rakenteilla päästään, joten niiden käyttö sopii paremmin monikäyttöisiin rakenteisiin, kuten toimistotalojen alapuolisiin parkkeihin. (Chrest et al. 2004, s.131.)

Paikallavaletut pysäköintirakennukset tehdään hyvin usein jänneteräksin ja jälkijännittämällä, millä päästään pitkiin jänneväleihin ja hoikkiin rakenteisiin. Lisäksi pitkä- ja lyhytaikaistaipumat ovat pieniä ja halkeamia syntyy vähän tai ei ollenkaan. Jälkijännityksen etuna voidaan pitää sen hyvää vesitiiveyttä, jolloin harjateräkset eivät pääse veden kanssa kosketuksiin, mikä lisää rakenteen säilyvyyttä. Jälkijännitetyillä rakenteella on myös erinomainen kestävyys väsytyskuormituksia vastaan. (Mannonen 2008, s.84.)

Vaikka jälkijännittäminen yleisesti vähentää halkeilua, ei ole välttämätöntä tai edes välttämättä toivottavaa suunnitella jälkijännitystä kantamaan kaikkea rakenteen omaa painoa. Päinvastoin, sitä tulee käyttää vähentämään vetojännitystä strategisissa pysyvän kuorman paikoissa. Liiallinen jälkijännittäminen lisää sekä kimmoista kokoonpuristumaa, että hiipumaan yhdistettyjä ongelmia. Jo alhaisimmalla tehollisella jälkijännittämisen tasolla nämä seikat on huomioitava suunnittelussa. (Chrest et al. 2004, s.450.)

Pysäköintirakennuksissa pystyrakenteena on yleisesti pilarirunko. Jälkijännitetyssä ratkaisussa vaakarakenne muodostuu tasavahvasta laatasta tai palkkikaistoin vahvennetusta laatasta, kun jännevälit kasvavat yli 10 metrin. Kun pyritään avaraan ja pilarittomaan pysäköintitilaan, rakenne muodostuu siten palkilliseksi laattarakenteeksi. Jännemittarunkosyvyyden suunnassa on 17 metriä ja pilariväli riippuen autopaikkojen mitoituksista 5 tai 7,5 metriä. Paikallavalettu rakenne on kuitenkin erittäin joustava myös muille pilariväleille ja pysäköintilaitoksen muodoille. (Mannonen 2008, s.85.)

Jännitetyt pilarilaatat kehitettiin pääasiassa Yhdysvalloissa ja Australiassa. Jälkijännitetyn rakenteen periaatteena on, että tartunnattomat jänneteräkset ankkureineen valetaan

betonin sisään. Kun betoni on saavuttanut riittävän lujuuden, suoritetaan jännitys ja kii-  
laus ankkureihin. Jännevoima siirtyy rakenteeseen ankkureiden välityksellä sekä jänne-  
teräksen aaltoisuuden aiheuttamana rakennetta ylöspäin nostavana voimana. Jännitys  
mahdollistaa pitkät jännevälit ja hoikan rakenteen, johon ei synny halkeamia eikä suuria  
taipumia kovassa kuormituksessakaan. (Mannari 1992, s.84.)

## 2.2.2 Hyödyt ja haitat

Paikallavaletun jännitetyn rakenteen hyötyjä (Walker s. 44):

- massiivinen yhtenäinen rakenne, jolloin liitoksia on vähemmän
- jälkijännittäminen vähentää laatan halkeilua, jolloin teräksiset ovat hyvin kor-  
roosiosuojatut
- välipohjan värähtely huomaamatonta
- pienemmät lyhyt- ja pitkäaikaistaipumat
- pienemmät huoltokustannukset
- pitkät jännevälit ja hoikat rakennepaksuudet
- jännitetyn rakenteen hyvä vesitiiviys

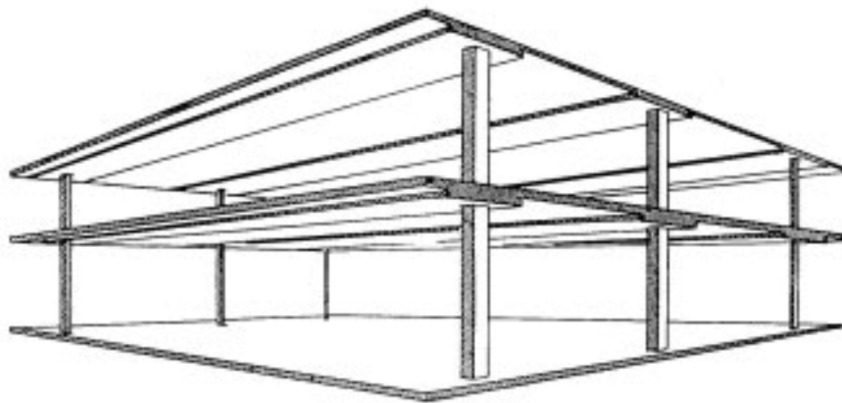
Paikallavaletun rakenteen haittoja:

- mahdollisesti korkeammat rakennuskustannukset
- pidempi rakennusaika
- tiheämpi liikuntasaumajako
- suurempi vaatimus tuennalle rakennusaikana

## 2.2.3 Yleisimmät rakenteet

### Jälkijännitetty palkillinen laattarakenne

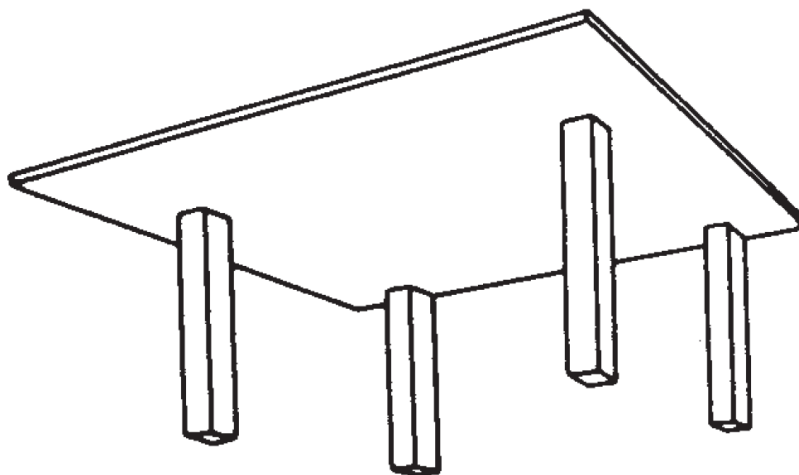
Jälkijännitettyssä ratkaisussa vaakarakenne muodostuu palkkikaistoin vahvistetusta laatasta. Kun pyritään avaraan ja palkittomaan pysäköintitilaan, rakenne muodostuu siten palkilliseksi laattarakenteeksi. Vahvistettuja palkkikaistoja käytetään erityisesti suurten kuormitusten ja suurten jännevälien yhteydessä. Palkkikaistojen suunnaksi on taloudellisinta valita pidemmän jännevälän suunta. (Aho et al. 2005, s.5.)



Kuva 2. Jälkijännitetty paikallavalurakenne (Aho et al. 2005).

### Tasavahva massiivinen pilarilaatta

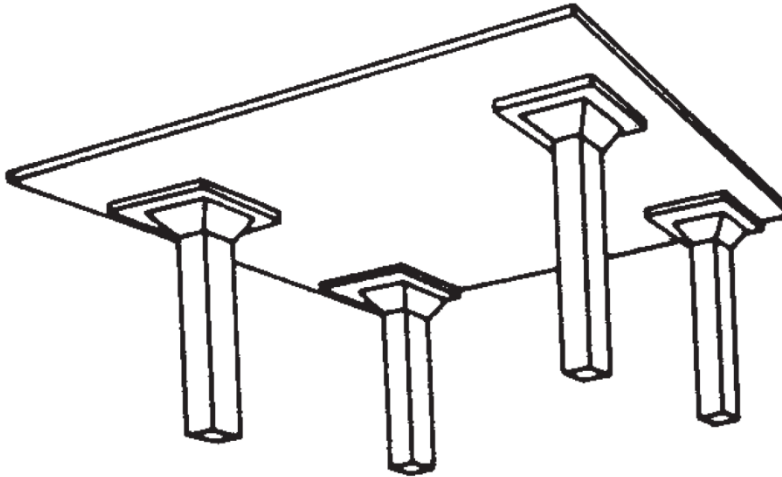
Tasavahvan pilarilaatta on tuotantotekniikan kannalta soveliaain laattarakenne, jossa laatan alapinta on täysin tasainen ja mahdollistaa siten pöytämuottitekniikan tehokkaan hyödyntämisen. Jänneväli vaatimuksesta riippuen rakenne voidaan toteuttaa joko jännittämättömänä tai jännitettynä. (RT 82-10914, s.10.) Toisaalta laattarakenne sopii parhaiten liikerakennuksiin, jännevälin jäädessä 7-10 metriin. Pysäköintilaitoksissa pyritään esteettömyyteen ja pitkiin jänneväleihin, joten tämä rakenne ei sovi parhaiten niihin. (Mannari 1992, s.85.)



Kuva 3. Tasavahva pilarilaatta. (RT-kortti).

### Sienilaatalla vahvistettu pilarilaatta

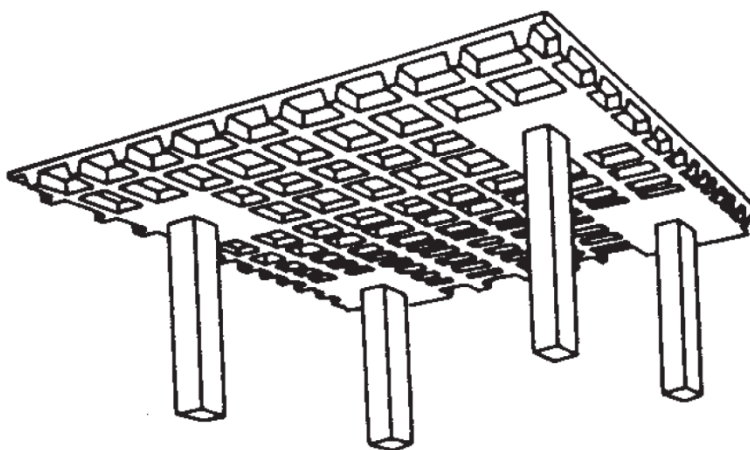
Kun pilarilaattoja halutaan käyttää pidemmillä jänneväleillä tai kuormitus on suurempaa kuin  $5\text{--}6\text{ kN/m}^2$ , voi olla järkevämpää käyttää sienilaattaa pilarien päällä. Sienilaatalla vahvistettu pilarilaatta sopii liikerakennuksiin ja paikoitustiloihin, joissa jänneväli on 10-12 metriä. (Mannari 1992, s.86.)



Kuva 4. Sienilaatalla vahvistettu pilarilaatta (RT-kortti).

### Kuppilaatta

Niin sanottu kuppilaatta valitaan usein pelkästään esteettisistä syistä, mutta käyttämällä rivoissa jännityskaapeleita siitä voi tulla myös taloudellisesti kilpailukykyinen vaihtoehto. Pelkästään pysäköintiä ajatellen tämä järjestelmä ei tule kysymykseen ja yleensä tämän järjestelmän valinta johtuukin muista syistä. (Mannari 1992, s.86.)

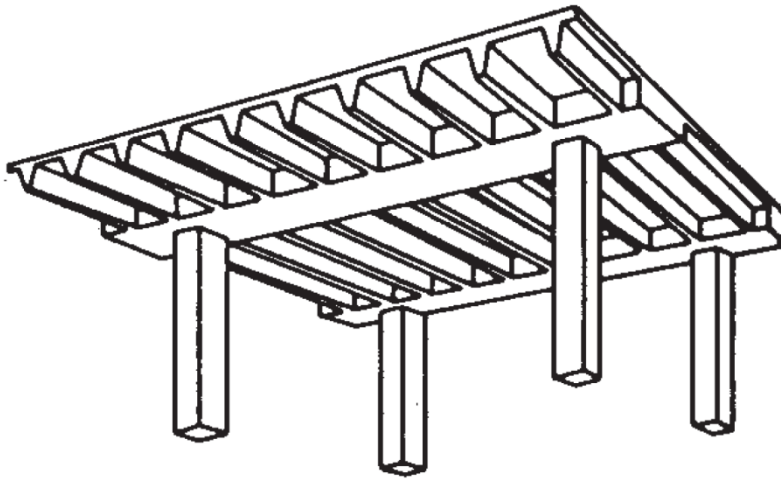


Kuva 5. Kuppilaatta (RT-kortti).



## Ripalaatasto

Ripalaataston pilariton jänneväli voi olla 12-20 metriä. Tämä on kilpailukykyinen vaihtoehto tehdasvalmisteisille elementeille. Kuormituksella  $2-5\text{kN/m}^2$  ripaetäisyydeksi saadaan noin 1,5 metriä ja suhteen  $L/h$  käyttöarvo on 35. Tämä järjestelmä soveltuu dimensioidensa ja väljyyden puolesta erinomaisesti pysäköintilaitoksen välipohjalaataksi. (Mannari 1992, s.88.)

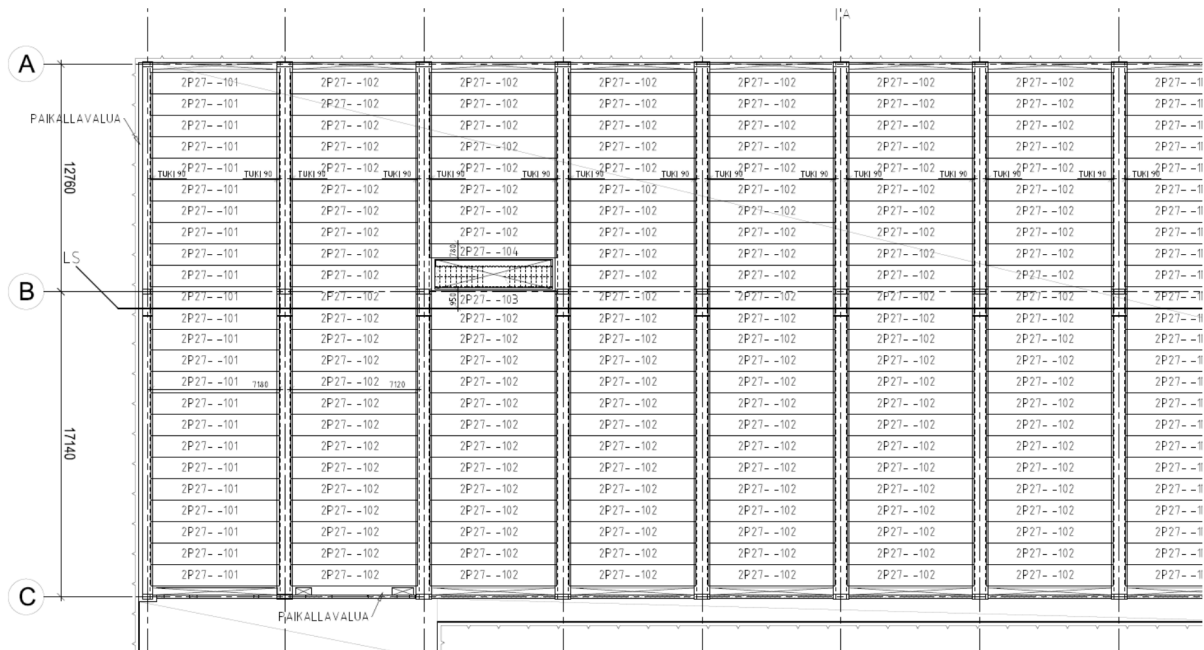


Kuva 6. Ripalaatasto (RT-kortti).

## 2.3 Betonielementtirakenteet

### 2.3.1 Tausta

Elementtirakenteella tarkoitetaan primäärirakenteisia palkkeja ja laattarakenteena betonielementtilaatastoja. Yleensä elementtirakenne suunnitellaan liittorakenteeksi, jolloin saavutetaan muun muassa parempi lujuus. Maanalaisessa kohteessa katsottiin tarkoituksenmukaiseksi jättää tarkastelun ulkopuolelle vaihtoehto, jossa laatasto on sijoitettu ylhäältä katsottuna poikittain suhteessa pysäköintitunnelin pituusleikkaukseen, katso kuva 7. Tähän ratkaisuun päädyttiin laattojen suuren koon, vaikean liikuteltavuuden ja asennuksen haasteellisuuden johdosta. Palkit sijoitetaan poikittain suhteessa pysäköintitunnelin pituusleikkaukseen (pisin jänneväli 17 metriä) ja laatasto palkkeihin tukeutuen pituuden määräytyessä pilarijako, tässä kohteessa pilarijako on 7,8 metriä.



Kuva 7. Havainnekuva palkkien ja laattojen asemoinnista (Toriseva).

Palkkiliittymien detaljit ovat kriittistä. Liitokset ovat usein alttiita veden tunkeutumiselle rikkoutuneen pintabetonin tai vuotavien liitosten johdosta. Ruostumattoman teräksen käyttäminen on tärkeää ankkuroinnissa ja liittymissä, jotta vältetään metallin korroosiolta ja korroosiosta johtuvista betonin lohkeamiselta. (Chrest 2004 et al. s.453-457.)

### 2.3.2 Hyödyt ja haitat

Elementtirakenteen hyötyjä (Walker s.45):

- laadun varmistus on parempaa, koska rakenneosat valmistetaan tehtaassa
- mahdollisesti halvemmat rakennuskustannukset
- nopeampi rakennusvaiheen aikataulu
- suuremmat liikuntasaumavälit

Elementtirakenteen haittoja:

- Suurempi alttius vuotaviin liitoksiin
- Korkeammat huoltokustannukset tiivisteissä
- Painavien elementtien asennus ja liikuttelu hankalaa maanalaisissa tiloissa

Elementtirakenteella pysäköintilaitoksen välipohjarakenteeksi on kaksi ensisijaista etua, rakennusosien laatu on hyvä ja asennuksen nopeus vähentävät työmaalla käytettyä aikaa ja sitä kautta kustannuksia. Haittapuolina ovat asennus ja liitosten sekä tiivistettyjen

saumojen hoito. Tehtaissa tehdyissä osakomponenteissa on myös pienet toleranssit. (Chrest 2004, s.453.)



















Melkein kaikki betonipalkkityypit ovat mahdollisia. Poikkileikkaus voi olla suorakaide-, I-, tai T- poikkileikkaus. Palkki voi olla esijännitetty tai jännittämätön. (Chrest 2004, s. 464.)



### 2.3.3 Yleisimmät betonielementtipalkkirakenteet

#### Tavanomaisesti raudoitettu teräsbetonielementti

Jännittämättömiä betonielementtejä käytetään joskus arkkitehtoonisissa rengaspaikkeissa tai rakenneosissa, joissa on lyhyt jänneväli, joten ne eivät sovellu hyvin pysäköintilaitosten välipohjarakenteiksi. (Chrest 2004, s. 456.)

Kuvassa 8 on esitetty suorakaidepalkin suosituskoot. Tummennettuina ovat suositellimmat palkki-poikkileikkaukset. Suosituskoot pätevät jänne- ja teräsbetonipalkeille. ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi).)

		PALKIN LEVEYS			
		2M 180	3M 280	4M 380	5M 480
PALKIN KORKEUS	3M 280				
	4M 380				
	5M 480				
	6M 580				
	7M 680				
	8M 780				
	9M 880				
	10M 980				

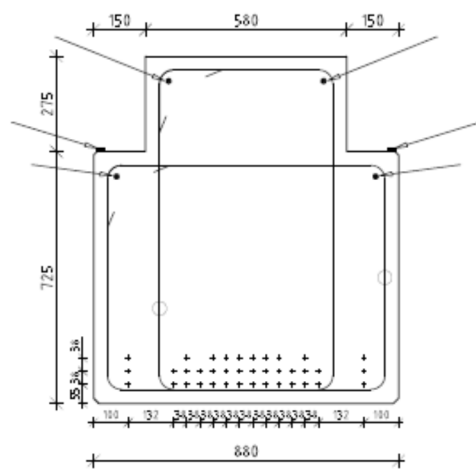
 SUOSITELTAVIN  
 SUOSITELTAVA

Kuva 8. Suorakaidepalkin suosituskoot ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi)).

#### Esijännitetty teräsbetonielementti

Asianmukaisesti tehty jännittäminen saa aikaan lujuutta sekä matalampia laattoja, palkkeja ja kannattimia. Jännittämistä voidaan käyttää myös pelkästään rakenneosien suojaamiseen kuljetuksen ja asentamisen ajaksi. Kunnollinen jännittäminen vähentää tehokkaasti käyttökuorman aiheuttamia halkeamia ja vähentää veden joutumista rakenteisiin. Jännitetyt betonielementtirakenteet ovat jo altistuneet täydelle kimmoisalle kokoonpuristumalle ennen asennusta, joten myöhempi kimmoisa kokoonpuristuminen voidaan jättää huomiotta. (Chrest 2004, s.456-467.)

Palkkien esikorottamisella saadaan aikaan puristustila pintabetoniin, mikä edesauttaa rakenteen vesitiivyyttä. Esikorottamisella eliminoidaan myös pysyvän kuorman aiheuttamia taipumia.



Kuva 9. Esijännitetty teräsbetonipalkki (Toriseva).

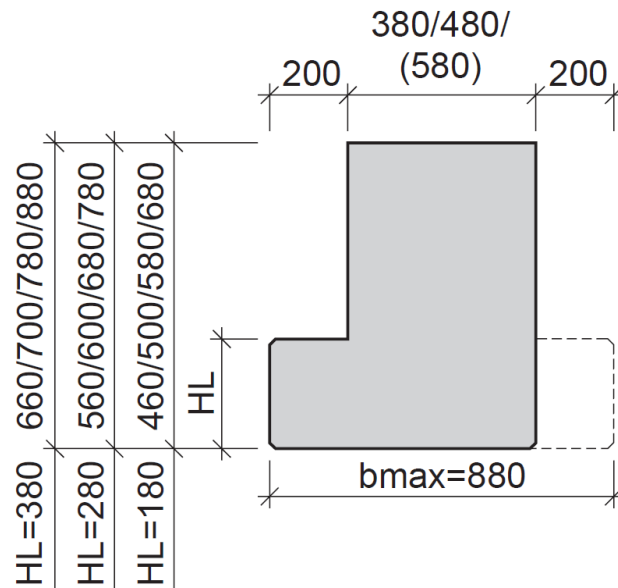
### Jälkijännitetty teräsbetonielementti

Betonielementin yhdistäminen jälkijännittämiseen voi olla toivottavaa. Näin tehtäessä on huomioitava, että jännittäminen ei johda ei-toivottuihin muutoksiin rakenteen geometriassa, ei jännittämisen aikana eikä pitkällä aikavälillä. Yksittäiset palkit voidaan myös jälkijännittää. Tavallisin on kohde, missä suuri palkki on esijännitty omaa, pysyvää ja työnaikaista kuormaa varten ja jälkijännittäminen on muuttuvia kuormia varten. (Chrest 2004, s.468.)

### Leukapalkki

Leukapalkin päämitat suositellaan valittavaksi kuten suorakaidepalkeilla. Uuman suositeltavat leveydet ovat 380, 480 ja 580 mm. Uuman korkeus valitaan tuettavan laattatyyppin mukaan. Leuan leveytenä käytetään 200 mm. Raskaasti kuormitettujen, 500 mm korkeiden, ontelolaattojen yhteydessä suositellaan käytettävän vähintään 280 mm korkeaa leukaa. Kuvassa 10 on esitetty leukapalkin suositusmitat. Pohjan leveytenä suositellaan käytettävän moduulileveyttä. Etenkin jännitetyillä leukapalkeilla on käytettävä

pohjan leveytenä moduulileveyttä. Tämä johtuu jännitysalustoista. Leukapalkit voidaan tehdä jännitettyinä- tai teräsbetonipalkkeina. ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi))

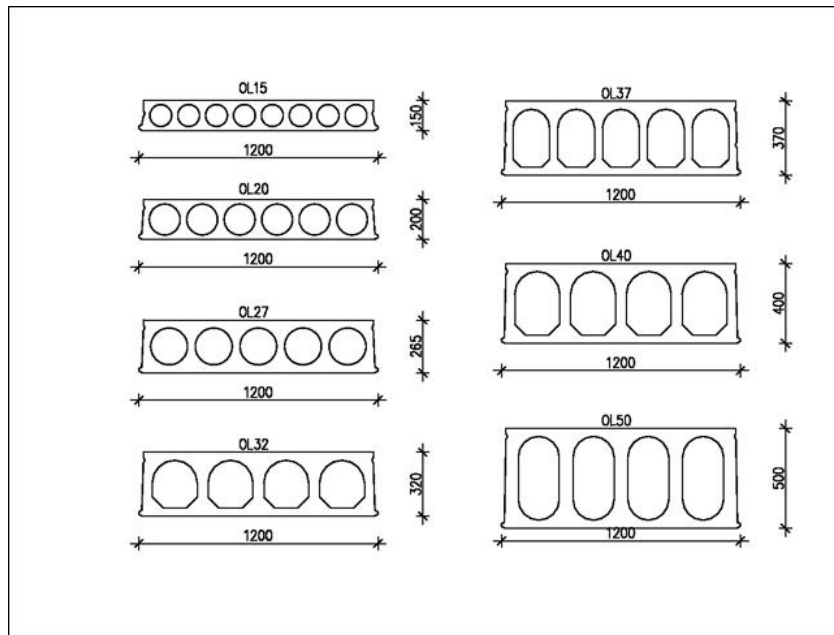


Kuva 10. Leukapalkkien suositusmitat (RT-kortit).

## 2.3.4 Yleisimmät betonielementtilaattaratkaisut

### Ontelolaatta

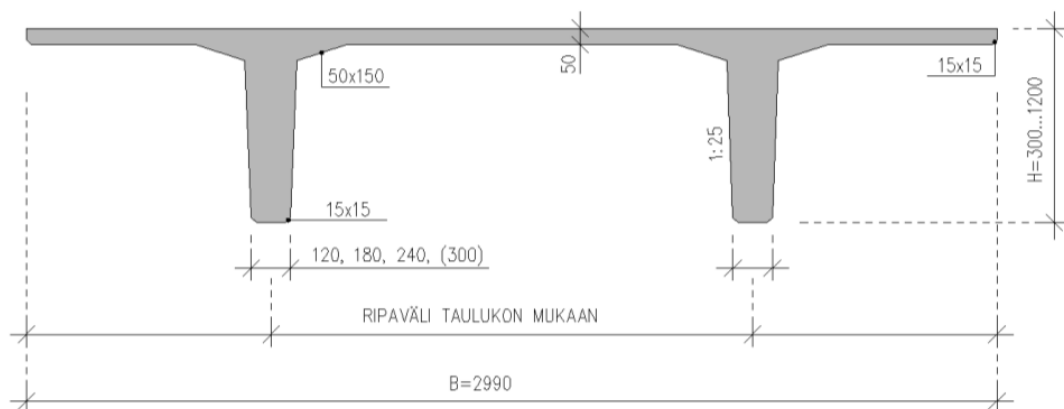
Ontelolaatta on yleisin elementtilaattatyyppe, jota käytetään betonirunkoisissa rakennuksissa. Ontelolaatat ovat esijännitettyjä laattaelementtejä, joita on kevennetty laatan pituussuunnassa kulkevilla onteloilla. Onteloiden korkeus, määrä ja muoto vaihtelee ontelolaatan korkeuden mukaan. Ontelolaatoilla vakioleveys on 1200 mm ja palonkesto yleensä ilman erillistoimenpiteitä REI 160. ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi))



Kuva 11. Tyypillisimmät ontelolaatat ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi)).

### TT-laatta

TT-laatat ovat esijännitettyjä teräsbetonelementtejä, joita käytetään kohteissa, joissa vaaditaan paljon tilaa sisätiloissa. Yleisiä käyttökohteita ovat teollisuus- ja varastorakennusten yläpohjat. Muita käyttökohteita ovat suurten myymälärakennusten sekä paikoitustalojen ala-, väli-, ja yläpohjarakenteet. TT-laattoja valmistetaan erityyppisiä ja elementtien mitat vaihtelevat valmistajakohtaisesti. TT-laatat voidaan suunnitella palo- luokkaan R30 – R120. ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi))

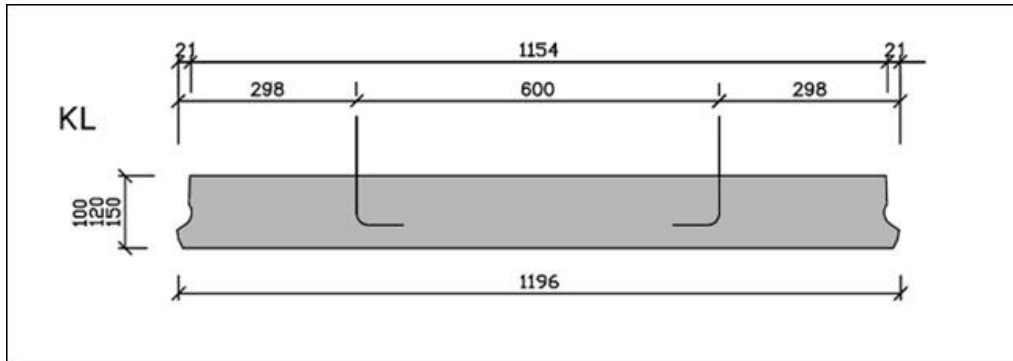


Kuva 12. TT- laatta ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi)).

### Kuorilaatta

Kuorilaatta on ohut, esijännitetty umpilaattaelementti, joka toimii muottina paikalla valettavalle betonille. Lopullisessa tilanteessa kuorilaatta toimii pääraudoituksen sisältävänä liittorakenteena yhdessä päälle valettavan betonin kanssa. Kuorilaatta käytetään

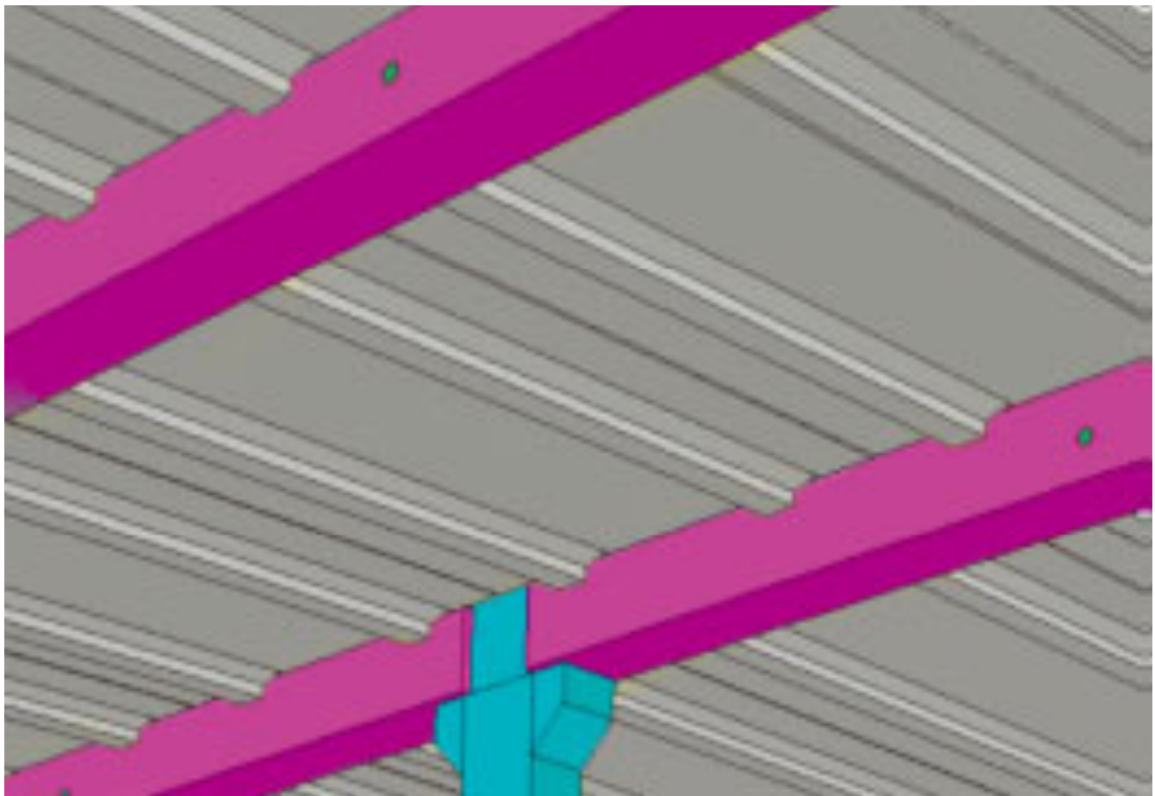
yleisimmin asuin- ja teollisuusrakennuksissa sekä pysäköintilaitoksissa. Kuorilaatta soveltuu erinomaisesti käytettäväksi niin betoni-betoni kuin betoni-teräs-liittorakenteen osana. Vakioleveys kuorilaatalla on 1200 mm ja vakiopaksuudet 100 mm, 120 mm ja 150 mm. Kuorilaatat täyttävät REI 160 palonkestovaatimukset ilman erillistoimenpiteitä. Yleensä kuorilaattojen alla käytetään tuentaa siihen asti kunnes pintavalu on saavuttanut tietyn lujuuden. ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi).)



Kuva 13. Kuorilaatta ([www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi)).

### Ripalaatta

Laatan alapuolelle on lisätty jäykistysrivat, jolloin pintavalun aikana ei tarvita erillistä tuentaa. Ripalaatta mahdollistaa pidemmät jänne- ja kehävälit, myös pilaripalkkirivit vähenevät, jolloin tilankäyttö paranee. Rakennusprosessi nopeutuu elementtimäärän vähentyessä. (Simola 2011, s.46-47.)



Kuva 14. Havainnekuva ripalaatasta (Parma Oy)

## 2.4 Teräsrakenteet

### 2.4.1 Tausta

Teräsrakenteet, tai paremmin ilmaistuna yhdistelmärakenteet, koostuvat sekä teräs- että teräsbetonirakenteista. Betoni on mukana jokaisessa rakenteessa, myös teräsrakenteissa. Teräsrakenteet suunnitellaan yleensä liittorakenteina, jolloin materiaalit saadaan käytettyä tehokkaammin. Suomessa ei teräsrakenteita ole käytetty pysäköintilaitoksissa yleisesti, mutta muualla Euroopassa kuten Iso-Britanniassa, ne ovat yleisesti rakenteina pysäköintilaitoksissa. Teräsrakentamisen käytön suosioon vaikuttaa voimakkaasti kansalliset normit ja rakentamistapa.

### 2.4.2 Hyödyt ja haitat

Hyödyt (Walker s.46):

- kevyemmät rakenteet johtavat kevyempiin perustuksiin ja helpottavat asennusta
- lyhyempi rakentamisaika työmaalla

Haitat:

- mahdollinen palosuojaus
- mahdollinen korroosiosuojaus maalaamalla
- toimitusajat voivat olla pidemmät
- korkeat hoito- ja ylläpitokustannukset
- kevyt rakenne altistuu helpommin värinälle

Teräsrakenteen etuja ovat muun muassa, keveys, tukevuus, taloudellisuus ja helppohoitaisuus. Liittorakenne hyödyntää materiaalit, rakenteiden kierrätettävyyden ja kierrätetyt materiaalit tehokkaammin ja minimoi hukan. Rakenteen keveys johtaa muita ratkaisuita tehokkaimpiin perustuksiin. (Corus, s.5.)

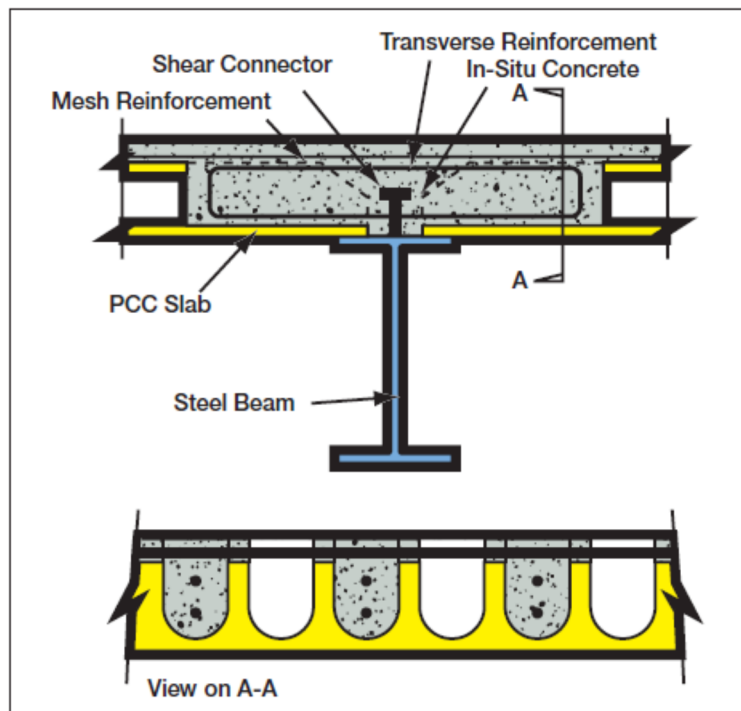
### 2.4.3 Yleisimmät ratkaisut

#### Ontelolaatta-teräspalkki

Kuvassa 15 nähdään ontelolaatta-teräspalkkiratkaisu liittorakenteena. Jotta liittorakenteen vaikutus saadaan aikaiseksi, on ontelolaattojen rakenne aukaistava siten, että paikallavalubetoni pääsee tunkeutumaan laataston sisään. Ratkaisu vaatii poikittaista lisä-



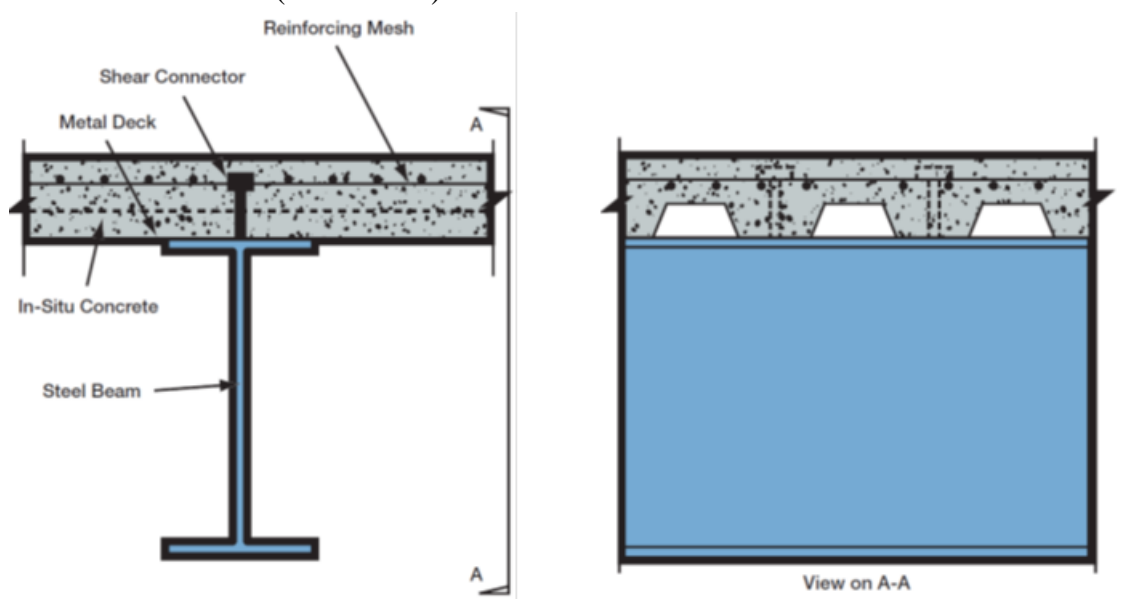
raudoitusta. Pintavalu sitoo rakenteet yhteen jolloin aikaansaadaan liittovaikutus sekä vedenpitävyys. (Corus 2004, s.10.)



Kuva 15. Teräspalkki ja ontelolaatta liittorakenteena (Corus s.10).

### Liittolevy-teräspalkki

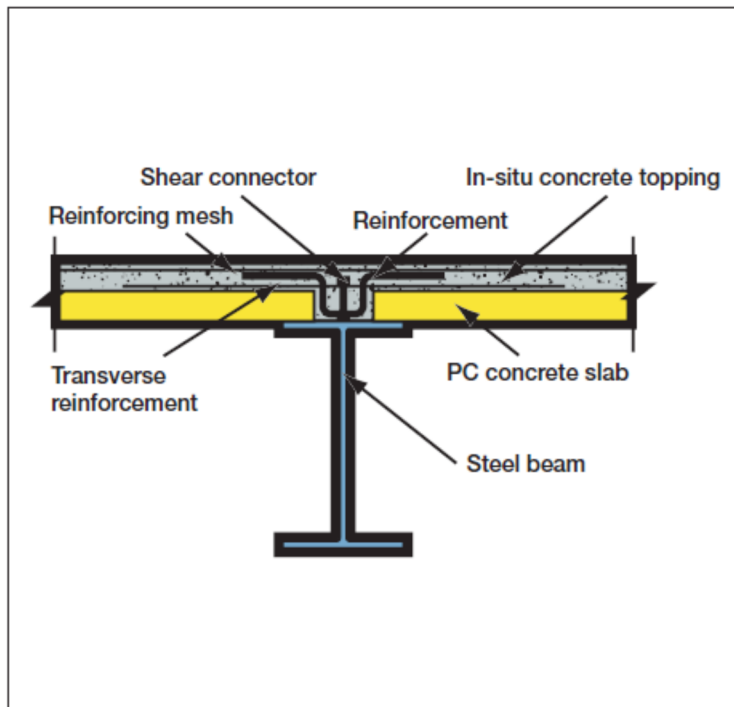
Liittolevyrakennetta teräspalkkiin tukeutuen on käytetty pienissä määrin Iso-Britanniassa. Metallilevy toimii liittolaatan osana, mutta se toimii myös pysyvänä raudoitteena nopeuttaen näin asennusta ja vähentäen nostokaluston vaatimuksia suhteessa muihin ratkaisuihin. (Corus s.11.)



Kuva 16. Teräspalkki ja liittolevy (Corus s.11).

## Kuorilaatta-teräspalkki

Kuvassa 17 on teräслиittopalkki-kuorilaattarakenne, jossa on pintabetonointi päällä. Suositelluin palkkiväli on 5 metriä, jolloin kuorilaatasto ei tarvitse valunaikaista tuentaa. Liittorakenne saavutetaan teräspalkin päälle hitsatuilla uurnatapeilla sekä kuorilaatan päällä olevilla tartunnoilla. (Corus s.12.)



Kuva 17. Teräspalkki ja kuorilaatta pintavalulla (Corus s.12).

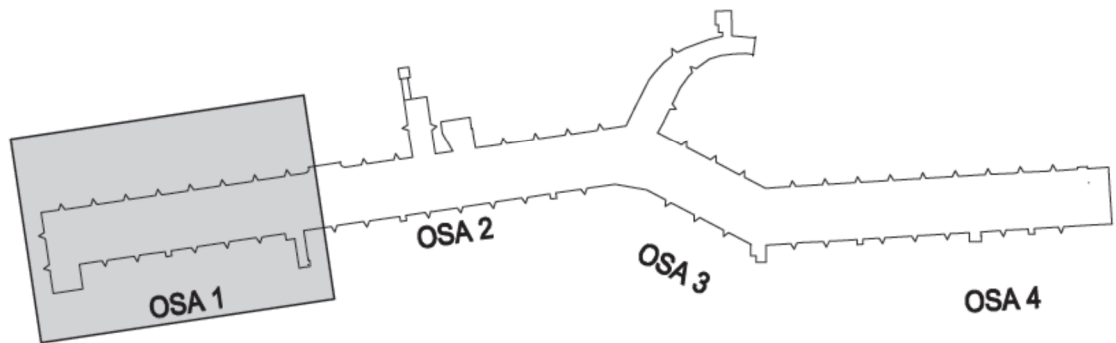
## 2.5 Case P-Hämppi

### 2.5.1 Vaihtoehtoisten suunnitelmien yleiset lähtötiedot

Tarkoituksena on laatia vaihtoehtoiset rakennesuunnitelmat P-Hämpin paikallavaletulle jälkijännitetylle betoniholville. Tarkastelualueen pinta-ala on 3507 m<sup>2</sup>. Suunnitelmien laajuus ja tarkkuus tulee olla urakkalaskentatasoa. Suunnittelualueeseen kuuluvat alkuperäisten suunnitelmien moduulivälit 1-16/A-C (ks. kuva 18). Lähtökohtaisesti pyritään mahdollisimman vertailukelpoisiin vaihtoehtoihin. Seuraavassa on lueteltuna suunnitteluperusteet:

- alatasen vapaakorkeus pitää säilyä nykyisellään
- ylätasen vapaakorkeus pidetään nykyisellään, mutta kalliokattoa saa skaalata ylöspäin, suunnitelmissa on esitettävä selkeästi tarvittava tilantarve
- pilarien sijainnit pidetään paikoillaan, pilarien dimensioita saa muuttaa kohtuullisissa rajoissa
- pilarijako on 7,8 metriä

- palkin pituudet 13 ja 17 metriä
- nykyisiä reikäpiirustuksia tulee noudattaa pääpiirteittäin
- nykyisten rakennesuunnitelmien mukainen poistumistiekäytävä tulee huomioida rakennesuunnitelmissa, pääpiirteissään myös muut liittyvät rakenteet
- palotekniset vaatimukset pitää ottaa huomioon ja savunpoisto tulee toteuttaa samalla tavalla kuin nykyisessä ratkaisussa



Kuva 18. Tutkittava alue pysäköintilaitoksessa (A-Insinöörit).

## 2.5.2 Tekniset lähtötiedot

Tekniset lähtötiedot ovat suoraan tarjouspyynnön mukaisista A-insinöörien suunnitelmista.

- Suunnittelukäyttöikä 100 vuotta, koskee kaikkia rakenteita
- Rasitusluokat
  - Perustukset: XC2
  - Pilarit: XC3
  - Palkkien ja laattojen alapinnat: XC3
  - Palkkien ja laattojen yläpinta tai vaihtoehtoisesti pintalaatta: XC3, XC4 ja XD1
- Holvin betonilattian laatuluokka (by45): C-2-45, vesitiiviys, kulutuskestävyyttä parantava pinnoitus tarvittaessa (ja tarvittaessa kulutusvara)
  - Laatuluokan lujuusvaatimuksesta voidaan poiketa, mikäli valitaan kulutuskestävyyttä parantava pinnoitus, lopputuloksen pitäisi kuitenkin vastata nykyistä tasoa, jossa betonilattiassa on käytetty Mastertop 800 – käsittelyä (7kg/m<sup>2</sup>)

- Vesitiiviys voidaan toteuttaa vesitiiviiksi osoitetulla betonirakenteella tai jollain muulla yleisesti käytössä olevalla tavalla
- Palonkestoluokka R120 kantavien rakenteiden osalta
- Kaikki kuormat RakMK B1:n mukaan (RIL 144-2002, Rakenteiden kuormitusohjeet)
- Sallittu pohjapaine maanvaraiselle perustukselle  $p_{sall}=300\text{kN/m}^2$
- Ajoneuvokuorma  $q_k=2,5\text{ kN/m}^2$  tai pistekuorma  $F_k=10\text{ kN}$  (kuormaluokka IV)
- Pysäköintihallin puhdistuskaluston akselikuorma  $F_k=45\text{ kN}$

### 2.5.3 Valintakriteerit

Tutkimuksen alussa kartoitettiin maanalaiseen pysäköintilaitokseen parhaiten sopivia vaihtoehtoisia rakenteita. Rakennevaihtoehtoja ja -tekniikoita on lukuisia. Tähän tutkimukseen mukaan otetut ratkaisut on valittu yhdessä yhteistyöyritysten kanssa. Vaihtoehtoja karsittiin jättäen pois muut paikallavalettavat vaihtoehdot niiden tuotantotekniikan ja oletetun rakentamisajan samankaltaisuuden takia.

Tutkimuksen alussa pohdimme maanalaiseen pysäköintilaitokseen soveltuvia rakenteita yhdessä Tuomas Torisevan ja Olli Kerokosken kanssa. Toriseva kokosi yhteen listan kaikista mahdollisista rakenteista, jonka pohjalta valittiin kolme rakennetta. Valintakriteereinä pidimme rakenteiden palonkestoaikaa (R120), rasituksia, kuormia, vesitiiveyttä ja pitkän jännevälin toimivuutta ko. rakenteelle. Kävimme keskusteluja myös yhteistyöyrityksien kanssa ja pohdimme mahdollisia rakenteita.

## **3 TALOUDELLISET JA AJALLISET LASKELMAT**

### **3.1 Kustannuslaskennan menettelyt**

Kustannuslaskennan tarkoitus on selvittää yksittäisen tehtävän tai hankkeen kustannukset kattavasti. Kustannuslaskelma on kustannuslaskennan tuloste. Kustannuslaskelman laatiminen tarkoittaa kaikkia niitä toimenpiteitä, jotka on tehtävä halutun kokonaisuuden toteutuskustannusten selvittämiseksi ennen toteutukseen ryhtymistä päätöksenteon tueksi. (Kivistö 2012.)

Rakennushankkeen eri vaiheissa käytetään kustannuslaskennan eri menettelyjä. Seuraavassa on käyty läpi keskeiset laskentamenettelyt ja kerrottu mitä kustannuslaskentatapaa on käytetty tutkimuksessa.

#### **Tilakustannusmenettely**

Erilaisia kustannusvertailulaskelmia käytetään rakennushankkeen eri vaiheissa. Tarveselvitys- ja hankesuunnitteluvaiheessa tavoitteena on ennustaa hankkeen kustannukset ja määrittää hankkeen laajuus- ja kustannuspuitteet. Tilakustannuslaskentaa käytetään puitteen asetuksessa. Tilakustannusmenettelyssä määritellään hankkeen kokonaiskustannusten kohtuullinen hyväksyttävä taso. Tilalaskennassa hankeohjelman tilat hinnoitellaan tilatiedostoon sisältyvän tilahinnaston yksikköhinnoilla tilalaskelmaksi. (TALO 90-ryhmä 1994, s. 30.)

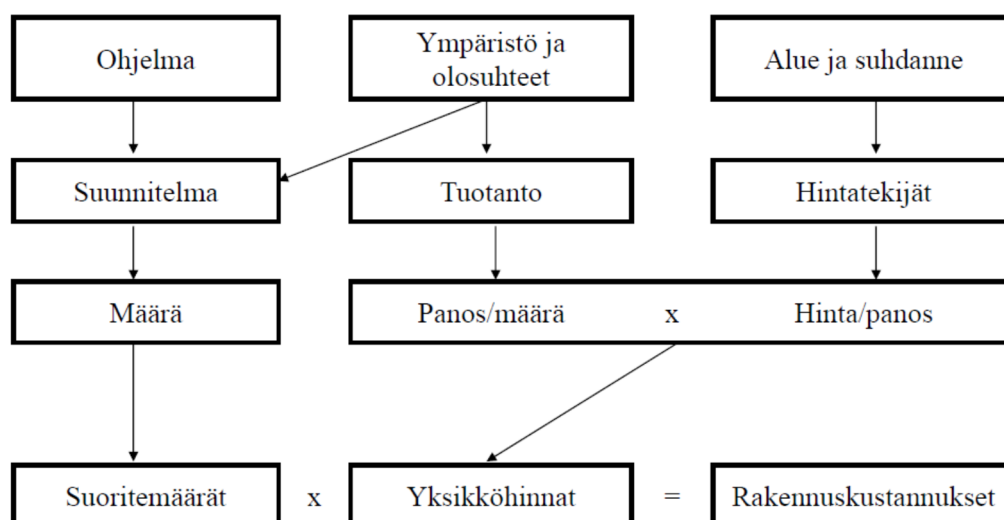
#### **Rakennusosa-arvio**

Ehdotus- ja luonnosvaiheessa tuotetaan ja kehitetään vaihtoehtoisia suunnitelmia. Jatko-suunnittelun pohjaksi valitaan hankeohjelman mukaiset tavoitteet ja vaatimukset täyttävä suunnitteluratkaisu. Suunnitteluratkaisuiden taloudellisuus arvostellaan rakennusosalaskelman perusteella. Luonnosvaiheessa rakennusosalaskelman kustannustaso on yleisen hinnaston tai yrityksen panoshinnaston mukainen. (TALO 90-ryhmä 1994, s. 40.)

#### **Tarjouslaskenta**

Tarjouslaskennan tarkoituksena on määrittää hankkeelle tarjoushinta. Hinta saadaan kun rakennusosalaskelmaan tai työlaajilaskelmaan lisätään tarjouksen lisäerät eli riskivaraus, kustannustason muutosvaraus ja työmaakate. Tarjoushinnan määrittäminen on urakallaskennasta erillinen toiminto, joka perustuu yrityksen ylimmän johdon määrittämään tarjouspolitiikkaan. (TALO 90-ryhmä 1994, s.43.)





Kuva 19. Kustannusten aiheutuminen (Kivistö 2012).

Panospohjaisen hinnoittelun periaatteen mukaan panoslajit eritellään kustannusten syntytavan mukaan neljään panoslajiin: (Talo 90 ryhmä 1994, s.19)

**Työpanokset** ovat kaikki välittömät ja välilliset korvaukset, jotka maksetaan työsuh- teessa oleville työmaan työntekijöille.

**Tarvikepanokset** ovat rakennusaineiden ja tarvikkeiden kustannukset, joihin ei sisälly toimittajien työmaalla tekemä työ.

**Aliurakkapanokset** ovat kauppa- ja aliurakkasopimuksin tehdyt hankinnat, joihin liit- tyvät tarvikkeiden ja kaluston lisäksi asennus- tai rakennustyötä työmaalla.

**Kalustopanokset** ovat rakennustyössä tarvittavat laitteet ja koneet.

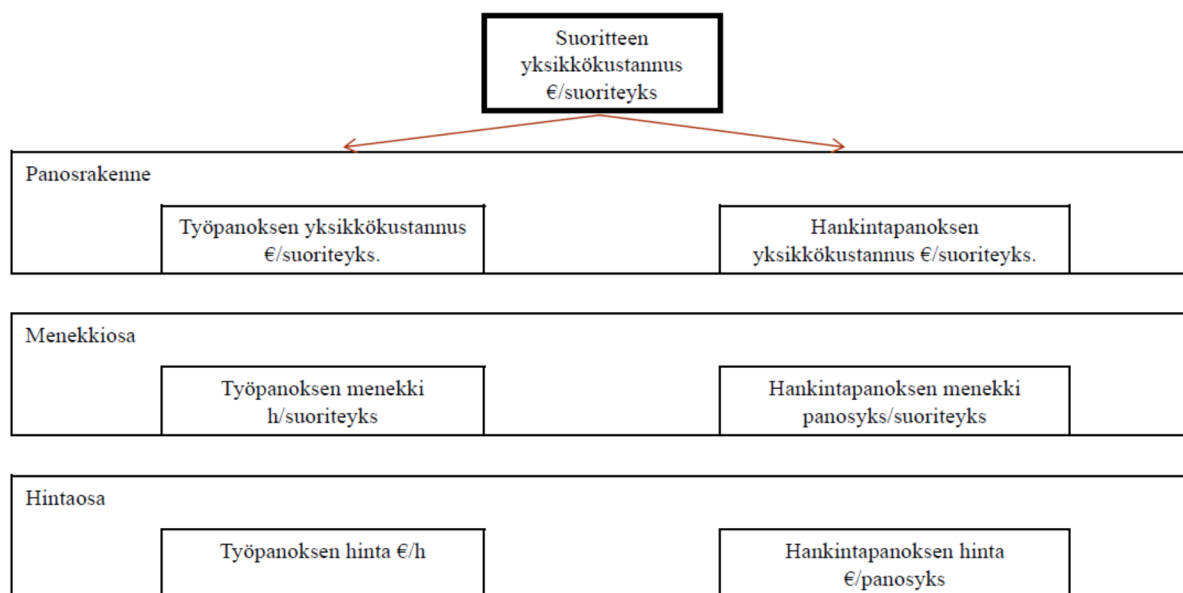
Työkustannusten hinnoittelussa hinta muodostuu menekki- ja hintaosasta. Työmenekki kuvaa työpanoksen käytön suoriteyksikköä kohden tth/yks. Työmenekkilähteitä ovat muun muassa yrityskohtaiset tiedostot, jälkilaskentatiedot ja RATU-kortit. Työmenek- kiin vaikuttaa työryhmän kokemus ja suoritelmäärä.

### 3.1.2 Suoritelaskenta

Hinnoittelulla määritellään nimikkeen yksikkö ja kokonaiskustannukset. Suorite on ra- kennusosan ja työlahin eli suorituksen yhdistelmä. Suoritelaskentaa käytettäessä määrä- luettelo on eritelty suoritteina. Suorite hinnoitellaan panoksiin perustuen panosrakentee- na tai kustannuslajeittain. Hinnoittelussa panoshinnat ovat nettohintoja ilman arvön- lisäveroa. Suoritelaskelma on puolestaan kustannuslaskelma, jossa määrät on eritelty ja

hinnoiteltu suoritteina. Panosrakenne kuvaa suoritteen rakentamisessa tarvittavia panoksia ja käytettävän menetelmän. (Kivistö 2012.)

Suoritteen hinnoittelun periaatteena on sisällyttää suoritteen yksikkökustannukseen kaikki ne työ ja hankintakustannukset, joiden määrään suoritemäärän muutokset vaikuttavat. Suorite hinnoitellaan siten, että työn ja hankintojen yksikkökustannukset voidaan erotella. Suoritteen yksikkökustannus lasketaan työn ja hankintojen menekki- ja hintaosan perusteella. Kuvassa 20 on esitetty suoritteen yksikkökustannus. (Kivistö 2012.)



Kuva 20. Suoritteen yksikkökustannus (Kivistö 2012.)

### 3.1.3 Tutkimuksessa käytetty kustannuslaskentamenettely

Tutkimuksessa sovellettiin TALO 80-nimikkeistön mukaista panospohjaista suoritelas-kentaa. Työmenekkitiedot saatiin Ratu-menekeistä muuttamalla niitä vastaamaan pa-remmin maan alla työskentelyä. TALO 80-nimikkeistön mukaisessa hinnoittelussa tun-tihinnat ovat ilman sosiaalikulua ja palkanlisiä, mutta tutkimuksessa tuntihintoja käy-tettiin alihankinnassa käytettyjä tuntihintoja, jotka ovat päivän hintatason mukaisia.

Työmaan käyttö- ja yhteiskustannuksia ei erikseen laskettu eri ratkaisuille. Rakennus-hankkeen työmaan käyttö- ja yhteiskustannusten aikasidonnaisista kuluista arvioitiin osuus jonka mukaan saadaan rakennusajan muuttuessa aikasidonnaisten kulujen muutos eri rakenteille. Eri ratkaisuille laskettiin kalustokustannukset kuitenkin erikseen. Kus-tannukset on eritelty siis työn, materiaalien ja kaluston osalta. Lisäksi kustannuksissa huomioidaan kallioprofiilin muutos rakennepaksuuden vaihdellessa. Louhintakustan-nuksissa huomioon otettiin lastaus- ja kuljetuskustannukset. Aikataulumuutoksia ei näin pienimuotoisesta louhintamäärän lisäyksestä aiheudu.



## 3.2 Ajalliset vertailulaskelmat

### 3.2.1 Yleistä

Aikataulusuunnittelu on prosessi, joka alkaa hankesuunnitteluvaiheessa rakennuttajan alustavan yleisaikataulun laadinnasta ja tarkentuu vaiheittain ajallisesti ja työsisällöllisesti tarkasti määritellyiksi tehtäväkohtaisiksi aikatauluiksi. Koko rakennustyömaan ja yksittäisten tehtävien ohjauksen kannalta on olennaista, että aikataulut perustuvat työkohteen ominaisuuksia vastaavaan työmenekkilaskentaa ja resurssisuunnitteluun. Tehtäväsuunnittelussa kiinnitetään erityistä huomiota ajallisesti kriittisten, kustannuksiltaan merkittävien, erityisen vaativien sekä erityisen paljon korjaustoimenpiteitä vaativien tehtävien suunnitteluun. Työmenekkitiedon tarkkuustaso vaihtelee, yleisaikataulua laadittaessa käytetään T4-kokonaisaikoja ja rakentamisvaihe aikatauluja laadittaessa käytetään tehollisia T3-aikoja, jotka eivät sisällä tunnin pituisia ja tuntia pidempiä keskeytyksiä. Tehtävän kesto lasketaan joko käyttäen työryhmän työsaavutusta tai työmenekkiä. (Mäki & Koskevesa 2007, s.8.)

**Kokonaisaika, työnvaihe aika T4**, sisältää kaikki työhön käytetyt tunnit, sisältäen myös tunnin mittaiset tai pidemmät työskentelykatkot. Kokonaisaikaa käytetään kustannusten arvioinnissa ja alustavan aikataulun laadinnassa. Kokonaisajat saadaan Ratumenekeistä kertomalla työvuoroajat TL3-lisäaikakertoimella. (Koskenvesa & Sahlstedt 2011, s.63.)

**Työvaiheen lisäaika, TL3**, tarkoittaa yli tunnin pituisia sääolosuhteista, laitteiden rikkoutumisesta, tapaturmista, pienistä erillisistä työvaiheista jne. johtuvia työn keskeytyksiä. (Koskenvesa & Sahlstedt 2011, s.63.)

**Tehollinen aika, työvuoro aika T3**, tarkoittaa tavoitteellisia työmenekkejä, jotka eivät sisällä yli tunnin mittaisia seisahduksia ja häiriöitä työskentelyssä. (Koskenvesa & Sahlstedt 2011, s.63.)

Tutkimuksessa ajallisissa vertailuratkaisuissa käytettiin T3-työvuoroaikoja, joihin lisättiin Ratu-menetelmän mukaiset työvaiheen lisäajat. Asennuksessa työaika arvioitiin nostokaluston työsaavutuksen mukaan, jolloin kerroin T3 aikaan on suurempi.

### 3.2.2 Kohteen määrälaskenta ja tehtäväluettelon laatiminen

Rakennuskohteen tuotannon suunnittelu aloitetaan kohteen määrälaskennalla. Välipohjarakenteen määrät selvitetään teknisistä suunnitelmista. Perinteinen paikallavalurungon tuotanto sisältää muottityön, raudoituksen, betonoinnin ja muottien purun. Tehtävät voivat sisältää useita työtehtäviä. Elementtirakenteinen runko puolestaan sisältää elementtityön, laatan raudoituksen ja pintavalun. (Kiiras & Pennanen 1995, s.5)

Tarjouslaskentamenettelyssä rakennuttaja normaalisti laadituttaa yksityiskohtaiset määräluettelot rakennuskohteesta ja liittää ne tarjouspyyntöasiakirjoihin. Urakoitsijat laskevat kustannusarvionsa ja antavat tarjouksensa määräluetteloihin perustuen kokonaishintaisena. (TALO 80 yleisseloste 1988, s.25.)

### 3.2.3 Tehtävien mitoitus ja tahdistus

Määrälaskennan ja tehtäväluettelon laatimisen jälkeen tehtävät mitoitetaan ja tahdistetaan. Työryhmien työsisältö määritetään ja valitaan työryhmän koko siten, että se yhtyy tahdistavaan keston. Tahdistava kesto on tuotantonopeuden määräävä kesto, johon kaikki tehtävät tahdistetaan. (Kiiras & Pennanen 1995, s.5.)

### 3.2.4 Yksittäisen tehtävän aikataulun laadinta

Tehtävien kesto voidaan laskea tahdistavan työryhmän työmenekkitiedon avulla tai tahdistavan työsaavutustiedon ja tehtävän suoritemäärän mukaan. Ali- ja sivu-urakoitsijoiden työmenekit ja työryhmät saadaan tiedostoista tai urakoitsijalta. Aliurakoitsijalta saatujen tietojen todenmukaisuus voidaan tarkistaa Ratu-tietojen ja oman kokemuksen avulla. (Koskenvesa & Sahlstedt 2011, s. 78.) Tutkimuksessa tehtävien kesto laskettiin tahdistavan työsaavutustiedon perusteella.

Ajallinen suunnittelu, kustannusten suunnittelu ja laadunvarmistaminen liittyvät tiukasti yhteen. Aikataulun mukaisesti eteneminen poistaa kiireen, jolloin myös laatutavoitteet on helpompi saavuttaa. Myös kustannustavoitteet saavutetaan paremmin mikäli aikataulu- ja laatutavoitteissa pysytään. (Koskenvesa et al. 2010, s. 11.)

Ajallisen suunnittelun lähtötietoina käytetään kohteen tai rakennusosan määrätietoja ja työvaiheen sisältöön kuuluvia työvaiheiden työmenekkejä. Työmenekkitiedot saadaan laskemalla ne Ratu-työmenekkitietojen tai yrityksen omien tietoja hyväksi käyttäen. Yksittäisen tehtävän aikataulutavoitteet selvitetään yleisaikataulusta tai rakentamisvaihe aikataulusta, mikäli aikataulutavoitteita ei ole suunniteltu yleisaikataulussa, suunnitellaan tehtävän kesto aloitus- ja lopetusajankohtineen työmaan muu tuotanto ja aikataulut huomioon ottaen. (Koskenvesa et al. 2010, s. 11.) Kuvassa 21 on esitetty kokonaistyömenekin laskentatapa. Kuvassa 22 on esitetty kokonaiskeston laskeminen työryhmän ja kokonaismenekin avulla.

$$\text{Kokonaistyo\textsubscript{menekki [tth]} = M\textsubscript{a\textsubscript{a}r\textsubscript{a} [yks]} \times \text{Ty\textsubscript{o}menekki [tth/yks]}$$

Kuva 21. Kokonaistyo\textsubscript{menekin tarkistaminen (Koskenvesa et al. 2010, s. 11).

$$\text{Ty\textsubscript{o}n kesto [tv]} = \frac{\text{Kokonaistyo\textsubscript{menekki [tth]}}}{\text{Ty\textsubscript{o}ryhm\textsubscript{a} [tt]} \times 8 \text{ h/tv}}$$

Kuva 22. Kokonaistyo\textsubscript{keston m\textsubscript{a}r\textsubscript{i}tt\textsubscript{a}minen (Koskenvesa et al. 2010, s. 11).

### 3.2.5 Teht\textsubscript{a}vien v\textsubscript{a}liset riippuvuudet

Ty\textsubscript{o}j\textsubscript{a}rjestyst\textsubscript{a} suunniteltaessa rakennuskohde jaetaan tarvittaessa osiin esimerkiksi rakennusten tai liikuntasauvojen mukaan. Yhden ty\textsubscript{o}n, ty\textsubscript{o}vaiheen tai teht\textsubscript{a}v\textsubscript{a}n tekeminen on riippuvainen kaikesta muusta mit\textsubscript{a} ty\textsubscript{o}maalla tapahtuu. Riippuvuudet ovat teht\textsubscript{a}vien v\textsubscript{a}lisiin ty\textsubscript{o}j\textsubscript{a}rjestyksen m\textsubscript{a}r\textsubscript{i}tt\textsubscript{a}via, valittuja tai ehdottomia rajoituksia. T\textsubscript{o}iden limityst\textsubscript{a} ja suoritusj\textsubscript{a}rjestyst\textsubscript{a} suunniteltaessa voidaan teht\textsubscript{a}vien v\textsubscript{a}liset riippuvuudet jakaa seuraaviin osiin (M\textsubscript{a}ki & Koskenvesa, 2007. s.22.):

- Luonnolliset riippuvuudet ovat ehdottomia, teknisesti mahdollista suoritusj\textsubscript{a}rjestyst\textsubscript{a} kuvaavia. Esimerkiksi raudoitus on asennettava ennen betonointia ja muotti voidaan purkaa vasta kun betonointi on tehty ja betoni saavuttanut riitt\textsubscript{a}v\textsubscript{a}n lujuuden.
- Olosuhderiippuvuudet m\textsubscript{a}r\textsubscript{i}tt\textsubscript{a}ntyv\textsubscript{a}t sopimusten, s\textsubscript{a}aolosuhteiden, ty\textsubscript{o}maaj\textsubscript{a}rjestyjen ja muiden tekij\textsubscript{o}iden perusteella.
- Tekniset riippuvuudet aiheutuvat toteutusteknisist\textsubscript{a} seikoista. Esimerkiksi laatta valetaan kahdessa osassa liikuntasauvan takia.

### 3.2.6 Teht\textsubscript{a}vien ajoitus ja resurssien t\textsubscript{a}saus

Kutakin teht\textsubscript{a}v\textsubscript{a}a varten lasketaan ty\textsubscript{o}n kesto ja valitaan perusty\textsubscript{o}ryhm\textsubscript{a}. Perusty\textsubscript{o}ryhm\textsubscript{a} ja menekkitiedot saadaan esimerkiksi Ratu-tiedostoista. Kestoa laskettaessa ty\textsubscript{o}menekki ja ty\textsubscript{o}saavutus valitaan tahdistavan ty\textsubscript{o}osan mukaan. Ty\textsubscript{o}menekin ja – saavutuksen arvioinnissa otetaan huomioon erilaisia tekij\textsubscript{o}it\textsubscript{a} (M\textsubscript{a}ki & Koskenvesa, 2007. s.23.);

- suoritem\textsubscript{a}r\textsubscript{a}n vaikutus harjaantumiseen
- kohteen koko ja vaativuus
- rakenneratkaisut ja rakennustekniikka

- koneiden ja kaluston kapasiteetti sekä kunto
- ulkoiset olosuhteet
- työnsuunnittelun onnistuneisuus
- työmaa- ja työpaikkajärjestelyt

Sijoitettaessa työtehtäviä aikatauluun otetaan huomioon:

- tahdistus, eli ratkaistaan, miten tehtävät saadaan kestoaltaan yhtä pitkiksi, tasaisesti piteneviksi tai lyheneviksi. Näin tehden rakennusajan käyttö on tehokasta ja tehtävät ovat ohjattavissa.
- rytmitys, eli ratkaistaan, miten tehtävät saadaan jatkuviksi, mikäli suoritemäärät vaihtelevat työkohteittain.
- työryhmien käytön jatkuvuus, eli tutkitaan miten ryhmä saadaan jatkuvasti työllistetyksi.

## 4 QSE-ANALYYSI

QSE-analyysissa rakenteita vertaillaan laadun (quality), työturvallisuuden (safety) ja ympäristö olosuhteiden (environment) kannalta. Tässä tutkimuksessa QSE-analyysia on käytetty apuna eri rakenteiden vertailussa.

### 4.1 QSE-analyysin osat

#### Laatu

Laadulla on käsitteenä monta määritelmää ja ulottuvuutta. Yksi tapa on jakaa se tuotteen tai palvelun laatuun sekä toiminnan, eli prosessin laatuun. Tuotteen laatu on kilpailutekijä, asiakkaan odotuksien ja huomion herättäjä. Lopputuotteen laadun elementit ovat; valmistuksen ja suunnittelun laatu sekä asiakkaan havaitsema suhteellinen laatu. (Mäki et al. 2008, s.9.) Analyysissä on laadun kannalta arvioitu eri rakenteille ominaisia laatuun liittyviä ongelmia tai laadullisesti hyviä ominaisuuksia.

#### Työturvallisuus

Rakennushankkeiden turvallisuuden varmistaminen on keskeistä johtamisessa, suunnittelussa ja toteutuksessa. Rakentamista koskevia työturvallisuusmääräyksiä on säädetty muun muassa valtioneuvoston asetuksessa (205/2009) rakennustyön turvallisuudesta. Tapaturmista aiheutuu paljon kustannuksia, joten turvallisella toiminnalla voidaan myös vaikuttaa hankkeen kustannuksiin ja parantaa yrityksen kilpailukykyä. Inhimillisestikin ajateltuna turvallinen tapa toimia on ainoa vaihtoehto. Hyvä turvallisuustaso vaikuttaa myönteisesti henkilöstön työilmapiiriin ja sitoutumiseen, sekä näin ollen myös tuotannon laadun paranemiseen. (Koski et al. 2010, s. 20.)

Työturvallisuudessa on huomioitu eri rakenteille ominaisia työturvallisuuteen liittyviä ongelmia ja tehtäviä, jotka ovat riskialttiita. Tehtyjen työtuntien määrä myös vaikuttaa työturvallisuuteen. Lemminkäinen Infra Oy:n työturvallisuushenkilöitä on haastateltu ja pohdittu yhdessä eri rakenteiden ongelmakohtia työturvallisuuden kannalta kyseisessä kohteessa ja maan alla rakennettaessa yleisesti.

#### Ympäristöolosuhteet

Ympäristöolosuhteet vaikuttavat rakennushankkeen aikataulun tekemiseen, työturvallisuuteen ja myös laatuun. Maan alla rakennettaessa ympäristöolosuhteet vaikuttavat voimakkaasti muun muassa työskentelyyn, työmaalogistiikkaan ja ilmanlaatuun. Ympäristöolosuhte-analyysissä on pohdittu miten tunneliolosuhteet vaikuttavat kuhunkin rakenteeseen, tuotantotekniikkaan, työmaalogistiikkaan ja työskentelyyn.

## 4.2 QSE-analyysin osatekijät

QSE-analyysi suoritettiin taulukkopohjaisena riskianalyysinä. Tulokset-osiossa eri rakenteista on esitetty kaavio, johon on kuvattu kokonaisuuden kannalta tärkeimmät tekijät QSE-analyysin kannalta. Tarkemmat QSE-analyysit ovat liitteissä 1-5. Laadullisia tekijöitä ovat:

- vesitiiviys
- liitokset
- työvaiheiden määrä ja riskialttius
- rakennusosien laatu

Työturvallisuuden tekijät:

- kompastuminen
- silmävamma
- puristuminen
- putoaminen

Ympäristöolosuhteiden tekijät:

- työmaalogistiikka
- työskentely
- rakenteiden toiminta ja paloturvallisuus
- ilmanlaatu

## 5 CASE P-HÄMPPI

### 5.1 Hankekuvaus

Rakennuskohde sijaitsee Tampereen ydinkeskustassa sijoittuen pääpiirteittään Hämeenkadun alle ulottuen Tullikamarin Pakkahuoneelta Koskipuistoon. P-Hämpin lattiataso on noin 25 metriä maanpinnan alapuolella ja pysäköintitilan pituus on noin 650 metriä. Autopaikkoja kohteessa on 965 kappaletta. Hankkeen bruttoala on 40 862 brm<sup>2</sup>, josta maanalaisen pysäköintilaitoksen välipohjarakenteen osuus on 12 350 m<sup>2</sup>.

Lemminkäinen Infra Oy:n pohja- ja insinöörirakentamisen yksikkö on pysäköintilaitoksen rakennusurakan pääurakoitsija. Hankkeen louhinta- ja lujitusurakasta vastasi puolestaan Lemminkäinen Infra Oy:n kalliorakentamisen yksikkö. Louhinta- ja lujitusurakka valmistui vuoden 2011 marraskuussa. Pysäköintilaitos valmistui vuoden 2012 marraskuun lopussa. Hankkeen tilaaja on Finnpark Oy.

Hankkeen suunnittelussa on kiinnitetty erityistä huomiota ilmapuuteen ja valoisuuteen. Suunnittelun päämääränä on ollut suunnitella kohde jalankulkijoiden, ei niinkään autoilijoiden ehdoilla. Jalankulkijoille on suunniteltu tilavat ja turvalliset kulkureitit siten, että kulku ajoteillä on minimoitu. Tilamitoitus on tehty tavallista väljempänä. Kuvassa 23 on havainnekuva pysäköintilaitoksesta. ([www.finnpark.fi](http://www.finnpark.fi).)



Kuva 23. Havainnekuva pysäköintilaitoksesta (huoneluettelo, ark-kuva).

Pysäköintilaitokseen johtaa kaksi ajotunnelia, joista läntinen sijaitsee Pellavantehtaan-kadun ja Rongankadun risteyksessä ja itäinen Pakkahuoneenaukiolla. Pakkahuoneenaukiolle valmistui Noutoparkki, joka toimii lyhytaikaisen pysäköinnin, esimerkiksi junien matkustajien saattoliikenteen pysäköintialueena. Pysäköintilaitoksesta on useita liittymiä läheisiin kiinteistöihin (ks. kuva 24).



Kuva 24. Pysäköintilaitoksen yhteyksien sijainti ([www.finnpark.fi](http://www.finnpark.fi)).

P-Hämpissä parkkipaikat on suunniteltu kahteen tasoon. Ensimmäisessä tasossa parkkipaikkoja on kolmessa rivissä ja toisessa tasossa kahdessa tai kolmessa, riippuen välipohjan leveydestä. Pysäköintiruutujen kulma on 72 astetta, leveys 2,6 metriä ja tehollinen pituus 5,5 metriä. Kuvassa 25 on poikkileikkauskuva pysäköintitunnelista.

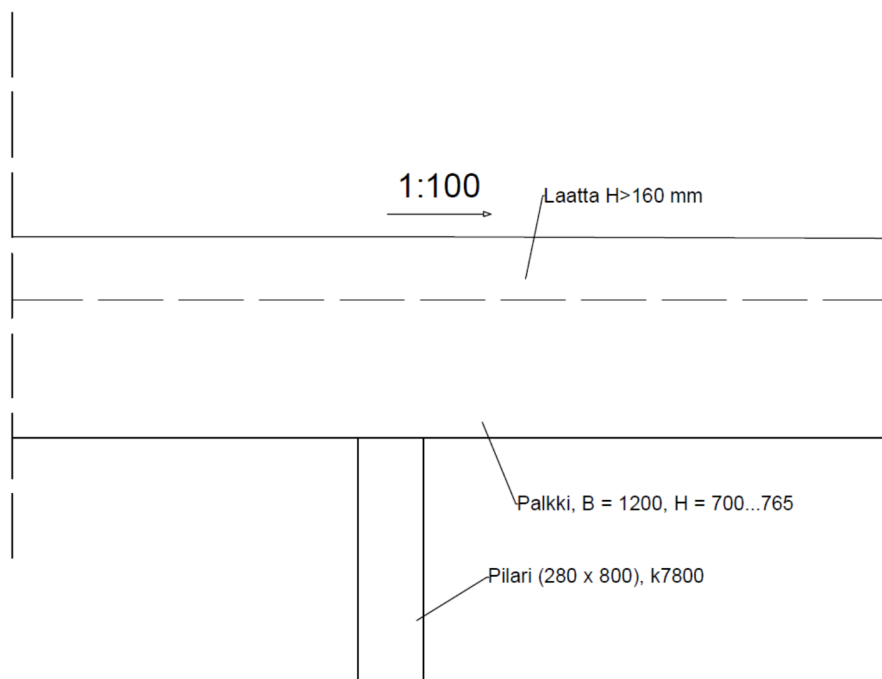




### 5.2.1 Vertailurakenne: jälkijännitetty paikallavalettu palkki-laattarakenne

Paikallavalettu palkki-laattarakenteen palkki- ja holvimuotit toteutetaan pöytämuottikalustolla. Palkkipöytämuottikaluston runko on tehty laatuluokitelluista puupalkeista ja muottipintoina palkinpohjassa Filmi-pintainen ensimmäisen luokan koivuvaneri. Holvimuottikalusto esikasataan työmaalla tunnelitiloissa ja siirretään paikalleen.

Raudoitus aloitetaan palkeista ja palkkien jännepunosten jälkeen asennetaan kenttäraudoitus. Jännepunokset asennetaan ensin palkkeihin ja holvin alapinnan raudoituksen valmistuttua asennetaan kenttien pituussuuntaiset punokset. Palkkien jännepunokset pukitetaan hitsaamalla työteräs palkkihakasiin ja kentissä käytetään erikorkuisia jännepunospukkeja ja Ø 10-12 mm työterästä. Raudoitteet ja jännepunokset nostetaan holvimuotin päälle kurottajalla, esikatottujen jännepunosten nostot nostoliinoilla. Jännepunoksina ja ankkureina käytetään MK4 tartunnatonta jännemenetelmää.



Kuva 26. Vertailurakenteen leikkauskuva keskipilarilinjalta.

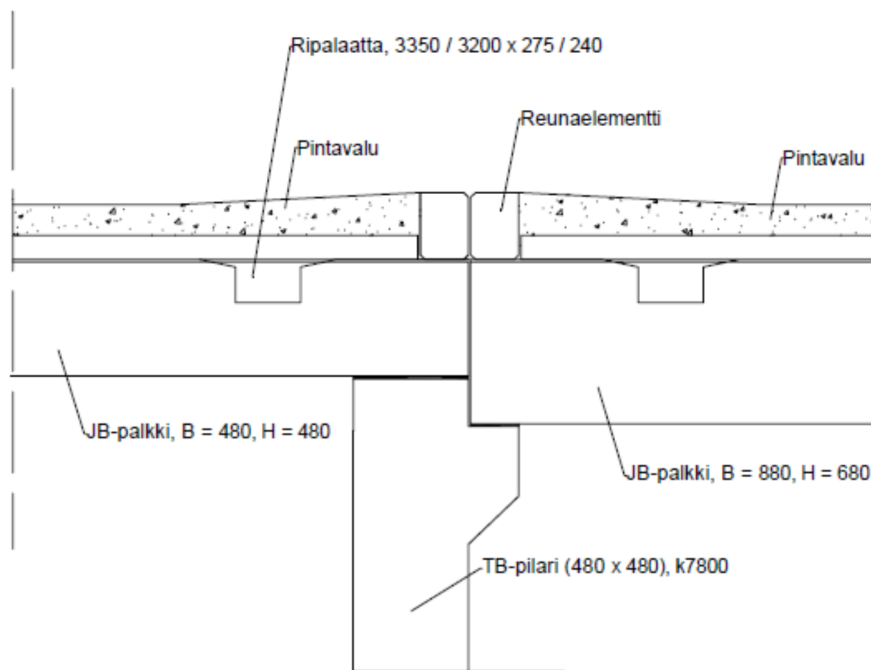
Pumppubetonoinnissa pumppuauto sijoitetaan kulloinkin valettavan kohteen viereen siten, että sitä ei tarvitse valun aikana siirtää. Holvibetonoinnissa valunopeus on 20-30 m<sup>3</sup>/h. Palkit betonoidaan kahdessa kerroksessa ja laatta yhdessä kerroksessa rintamana edeten.

Rakennettava kohde on jaettu kolmeen 1166 m<sup>2</sup> lohkokoon. Aikataulussa on otettu viikonlopun päivät myös huomioon. Betonoinnin suorittaminen perjantaina on optimaalisin

päivä. Näin toimien betoni saavuttaa halutun lujuuden viikonloppuna, jolloin myös jännittäminen voidaan suorittaa viikonloppuna.

### 5.2.2 VE1: Jännitetty teräsbetonipalkki – ripalaatta (Parma Oy)

Parma Oy:n ratkaisussa kantavan pystyrakenteen muodostavat 480x480 suorakaidepilarit. Pilarit liitetään perustuksiin jäykällä pulttiliitoksella. Taso rakennetaan liittorakenteena, joka muodostuu 680x680 jännebetonipalkeista ja liikuntasauaman kohdalla 680x880 (h x b) jännebetonipalkista. Palkkien päälle asennetaan ripalaatasto, jonka päälle tulee raudoitus ja pintavalu. Jännebetonipalkit tukeutuvat pilareiden yläpäähän tai betonikonsoleihin. Tasojen vapaille reunoille ja tason keskilinjalle asennetaan reunaelementit. Jännebetonipalkit ja ripalaatat asennetaan ilman asennusaikaisia tukia. Ennen laattojen päälle tulevaa pintavalua jännebetonipalkit tuetaan kolmannespisteistä. Betonin saavutettua riittävän lujuuden asennustuet poistetaan, jolloin rakenteen yläpintaan muodostuu puristusjännitys, joka myötävaikuttaa rakenteen vedenpitävyyteen. Parman ratkaisussa tutkittava alue on jaettu kuuteen liikuntasaumalohkoon. Liikuntasauaman kohdalle tuleva 17 metrin palkki painaa 25 tonnia, kevyemmät 20 tonnia tai vähemmän. Painavimman ripalaatan paino on 7,5 tonnia. Rakenteen paksuus on 850-890 mm, riippuen laatan kallistuksista.



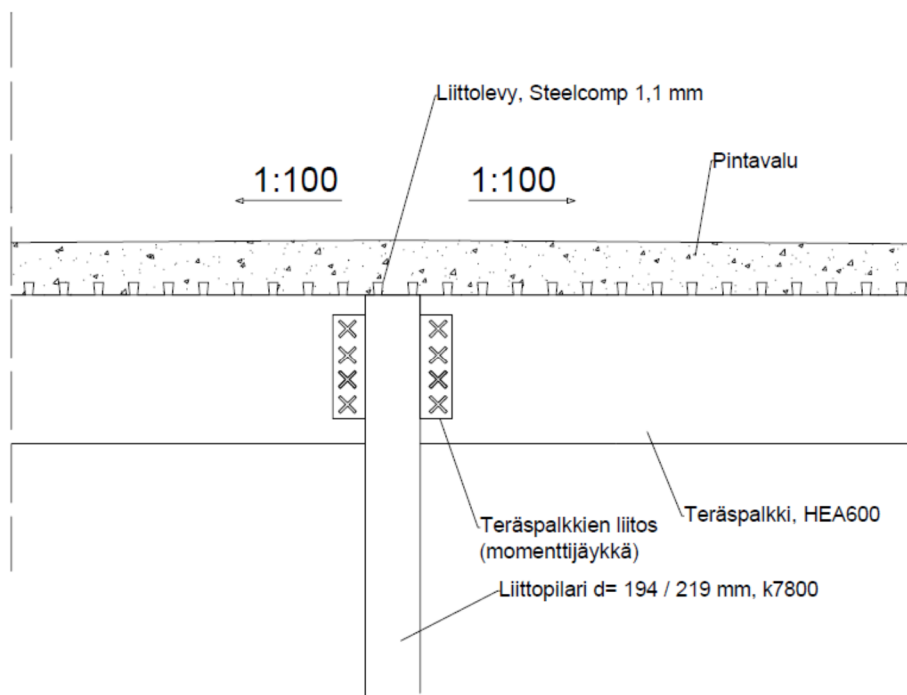
Kuva 27. VE 1:n leikkauskuva keskipilarilinjalta.

Asennus suoritetaan käyttäen kahta nosturiautoa. Järeämpi 365 tonnimetrinen nosturiauto kantaa kokonaan palkin taakan ja pienemmällä 100 tonnimetrillä nosturiautolla ohjailtaan palkki tarkasti paikoilleen. Ensin kaikki reunapilarit asennetaan koko tarkas-

telualueelle. Reunapilareiden asennuksen jälkeen asennetaan keskipilari, jonka jälkeen pilareiden päälle asennetaan palkit. Kumpaakin nosturiautoa voidaan käyttää ripalaataston asennuksessa. Rungon asennus on suunniteltu kestävän 18 työvuoraa. Reunapilareiden asennus kestää kaksi työvuoraa ja yhden pilarilinjan asennus laattoineen yhden työvuoron. Yhdessä pilarilinjassa ripalaattoja on 9 kappaletta. Raudoitustyöt on tahdistettu elementtiasennuksen kanssa. Pintavalut tehdään kuutena päivänä kahden viikon aikana.

### **5.2.3 VE2: Teräspalkki – jälkijännitetty liittolevy-laatta (Ruukki Construction)**

Ruukki Constructionin suunnittelemassa ratkaisussa kantavan pystyrakenteen muodostavat liittopilarit. Liittopilarit liittyvät anturoihin jäykällä pulttiliitoksella. Välipohja rakennetaan liittolevyrakenteena. Uumarei'itetyt HEA600-palkit tukeutuvat ympyrälieriön muotoisiin liittopilareihin (halkaisija 219 mm). Liikuntasauaman kohdalla primäärirakenne muodostuu kahdesta vierekkäin olevasta HEA600-palkista. Rakennetta voidaan optimoida tekemällä palkit hitsatuista I-profiileista, jolloin rakennepaksuudet saadaan laskettua mahdollisimman tarkasti. Toisaalta hitsatut profiilit ovat kuumavalssattuja ja kalliimpia, mutta massojen ollessa suuria tämä on kustannustehokkaampi keino. Palkkien päälle asennetaan 1,1 mm paksuiset steelcomp-liittolevyt, jotka tuetaan pilarivälillä kolmesta kohdasta. Liittolevyjen vapaille reunoille kiinnitetään rakenneteräskiinnikkeillä reunalista. Palkkien taipuma omasta painosta kompensoidaan 30-40 mm esikoroituksella. Palkit tuetaan keskijänteeltä valun ajaksi, samalla saadaan haluttu esikoroitus. Liittopilareiden sisällä on raudoitushäkki. Pilarin asennus on nopeaa ja betonointi tapahtuu asennuspaikalla laatan betonoinnin yhteydessä. Liittolevyjen rauditus tehdään tangoilla ja rauditusverkoilla. Rakenteessa on sovellettu toiminnallista palomitoitusta siten että rakenteilta vaadittu 120 minuutin palonkesto saavutetaan sprinklerisumutuksella. Tarkasteltava alue on jaettu kolmeen liikuntasaumalohkoon, jolloin laatan betonointi suoritetaan kolmena päivänä. Pilarilinjalla oleva pidempi HEA-palkki painaa 3 tonnia. Rakenteen paksuus on 780-820 mm, riippuen laatan kallistuksista.

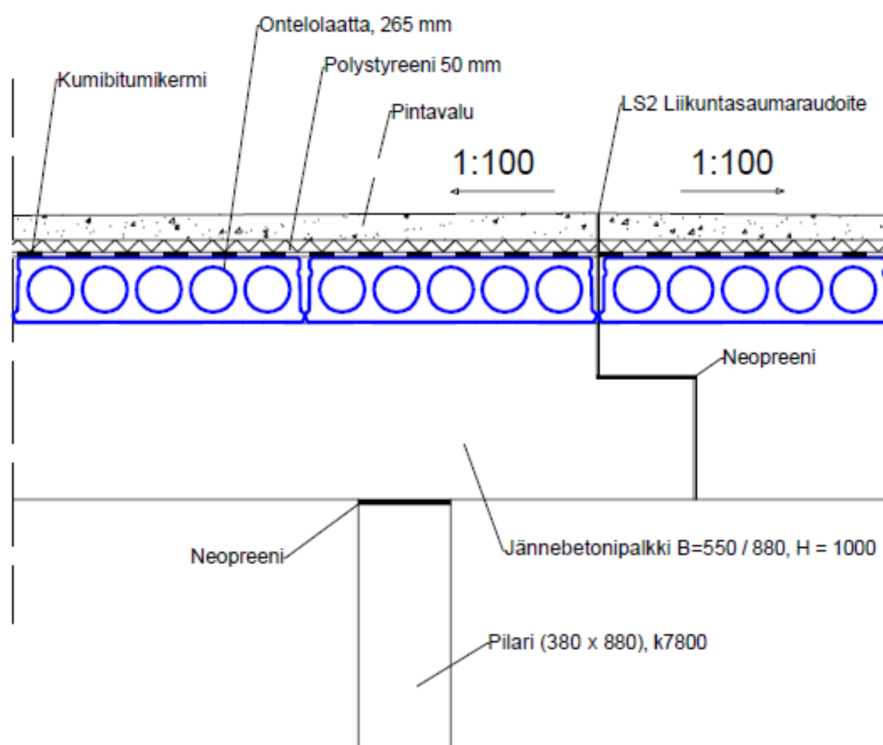


Kuva 28. VE2:n leikkauskuva keskipilarilinjalta.

Rungon asennus suoritetaan käyttäen yhtä autonosturia. Asennuksen periaate on sama kuin Parman ratkaisussa. Reunapilarit asennetaan ensin, jonka jälkeen keskipilari, palkit ja niiden päälle liittolevyt. Liittolevyjen tuenta, välipohjan raudoitus ja jännepunosten asennus tahdistetaan rungon asennuksen kanssa. Rungon asennuksen, liittolevy- ja tuentatöineen on suunniteltu kestävän 23 työvuorua.

#### 5.2.4 VE3: Jännitetty teräsbetonipalkki – ontelolaatta

Tässä ratkaisussa pystyrakenteen muodostavat teräsbetoniset suorakaidepilarelementit (880x380). Pilarit liitetään anturoihin jäykällä pulttiliitoksella. Välipohjataso rakennetaan jännebetonipalkkien päälle tukeutuvista ontelolaatoista ja niiden päälle tehtävästä kermieristyksestä, laakerikerroksesta ja pintabetonoinnista. Ontelolaatastolle tehdään saumaraudoitus ja -valu, jonka jälkeen asennetaan kermieristys, jolla aikaansaadaan vedenpitävyys. Tämän päälle tulee suulakepuristettu 50 mm polystyreenikerros, mikä erottaa laataston pintabetonista ja toimii laakerikerroksena rakenteiden välissä. Rakennettava kohde on jaettu neljään liikuntasaumalohkoon. Painavimman jännebetonipalkin paino on 30 tonnia ja ontelolaatan paino on kolme tonnia. Välipohjarakenteen paksuus on 1140-1180 mm riippuen kallistuksista.

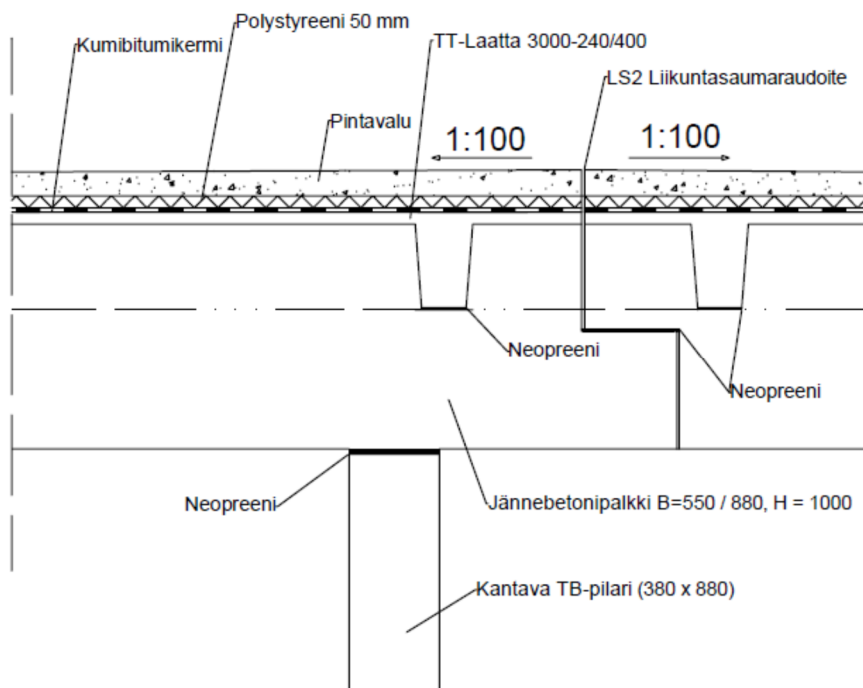


Kuva 29. VE3:n leikkauskuva keskipilarilinjalta.

Asennus suoritetaan käyttäen kahta nosturiautoa. Reunapilarit asennetaan ensin. Tämän jälkeen asennusjärjestyksessä; keskipilari, jonka jälkeen pilareihin nojautuen palkit, joiden päälle ontelolaatasto. Järeämpi 365 tonnimetrinen nosturiauto nostaa lähes kokonaan palkin taakan ja pienemmällä 100 tonnimetrillä nosturiautolla ohjaillaan palkki paikoilleen. Kumpaakin nosturiautoa voidaan käyttää laataston asennuksessa. Asennuksen eikä valun aikana tarvita tuentaa. Yhden työvuoron työsaavutukseksi on suunniteltu yksi pilarilinja, jossa ontelolaattoja on 24 kappaletta. Rungon asennus on laskettu kestävän 18 työvuoroa. Rauditus ja eristystyöt ovat tahdistettu elementtiasennuksen kanssa. Pintavalut tehdään neljänä päivänä kahden viikon aikana. Kokonaiskesto on 31 työvuoroa.

### 5.2.5 VE4: Jännitetty teräsbetonipalkki – TT-laatta

Kantavat pystyrakenteet muodostavat teräsbetoniset suorakaidepilarelementit. Pilarit liitetään anturoihin jäykällä pulttiliitoksella. Välipohjataso rakennetaan palkkien päälle tukeutuvista TT-laatoista ja niiden päälle tehtävästä pintabetonoinnista. TT-laatasto hitsataan yhteen. Laataston päälle asennetaan kermieristys, jolla aikaansaadaan vedenpitävyys. Tämän päälle asennetaan suulakepuristettu 50 mm polystyreenikerros, mikä erottaa laataston pintabetonoinnista, toimien laakerikerroksena rakenteiden välillä. Painavimman jännebetonipalkin paino on 30 tonnia ja painavimman TT-laatan 7,1 tonnia. Rakenteen paksuus on 1140-1180 mm, riippuen laatan kallistuksista.

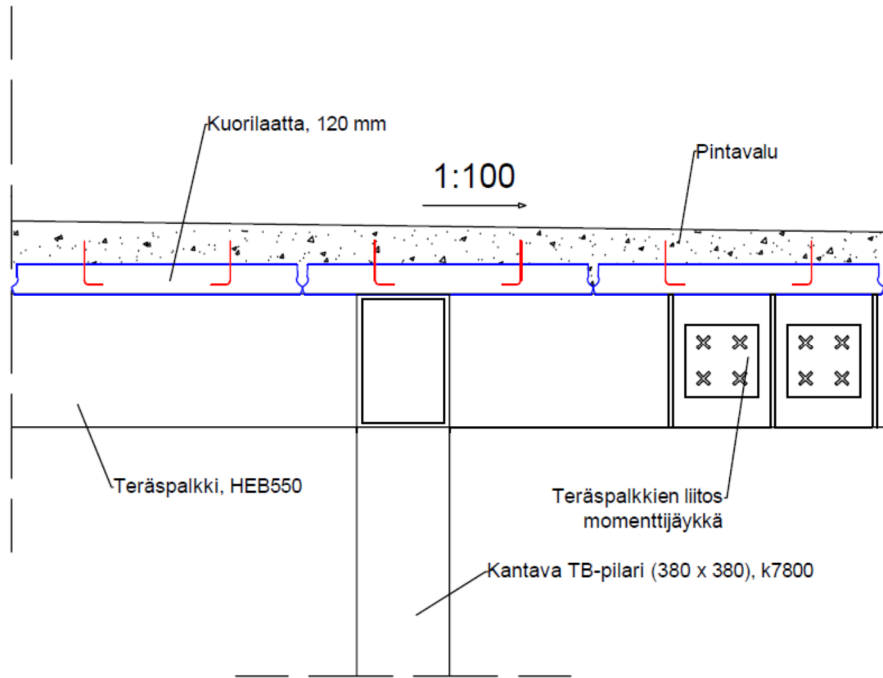


Kuva 30. VE4:n leikkauskuva keskipilarilinjalta.

Asennus suoritetaan käyttäen kahta nosturiautoa. Runkoasennus suoritetaan kuten aikaisemmatkin vaihtoehtoiset ratkaisut, reunapilarit ensin, jonka jälkeen keskipilari, palkit ja niiden päälle TT-laatasto. Järeämpi 365 tonnimetrinen nosturiauto nostaa lähes kokonaan palkin taakan ja pienemmällä 100 tonnimetrisellä nosturiautolla ohjaillaan palkki paikoilleen. Kumpakaan nosturiautoa voidaan käyttää laataston asennuksessa. Asennuksen eikä valun aikana tarvita tuentaa. Rungon asennus on laskettu kestävän 19 työvuoroo. Rauditus ja eristystyöt ovat tahdistettu elementtiasennuksen kanssa. Pintavalut tehdään neljänä päivänä kahden viikon aikana. Kokonaiskesto on 33 työvuoroo.

### 5.2.6 VE5: Teräspalkki – kuorilaatta, liittorakenteena

Kantavat pystyrakenteet muodostavat teräsbetoniset suorakaidepilarelementit. Pilarit liitetään perustuksiin jäykällä pulttiliitoksella. Välipohjataso on suunniteltu liittorakenteena pilarien päälle tukeutuvista HEB550 teräspalkeista ja niiden päälle tulevasta kuorilaatastosta. Yhden kuorilaatan paino on 2,8 tonnia. Kuorilaattojen päälle asennetaan rauditus ja tehdään pintavalu. Rakenteessa on sovellettu toiminnallista palomitoitusta siten, että rakenteilta vaadittu 120 minuutin palonkesto aikaan saadaan teräspalkeille sprinklerisumutuksella. Palkkien liitoskohta ei sijaitse keskipilarilinjalla, vaan pysäköintitunnelin keskilinjalla jäykällä liitoksella. Palkkien pituudeksi tulee 15 metriä ja painoksi 3 tonnia. Keskipilarilinjalle ei tule nivelellistä liitosta, jolloin siinä ei tarvita liikuntasaumaa. Tarkasteltava kohde on jaettu kahteen liikuntasaumalohkoon. Rakenteen paksuus on 770-810 mm.



*Kuva 31. VE5:n leikkauskuva keskipilarilinjalta.*

Asennuksessa käytetään yhtä autonosturia. Runkoasennus suoritetaan kuten aikaisemmatkin vaihtoehtoiset ratkaisut, reunapilarit ensin, jonka jälkeen keskipilari, palkit ja kuorilaatat. Asennuksessa ei tarvita kahta autonosturia teräspalkin keveydestä johtuen. Kuorilaattojen suuren määrän takia runkoasennuksessa kuluu 22 työvuoroa. Kokonaiskesto on 33 työvuoroa.



## 6 RATKAISUIDEN VERTAILU

### 6.1 Vertailun lähtökohdat

Ratkaisuissa vertaillaan läpimenoaikaa, työtehotunteja sekä välipohjan neliöhintaa, joka on jaettu materiaali-, työ- ja kalustokustannuksiin. Työmaan käyttö- ja yhteiskustannuksia sekä muita kustannuksia arvioidaan myös neliö hinnalla. Tutkimuksessa tutkittava alue kattaa noin neljäsosan koko hankkeen välipohja-alasta, joten vertailuindikaattoreita skaalataan koko hankkeen kokoon.

#### 6.1.1 Aika- ja kustannusvertailut

Vertailurakenteessa pilarit rakennetaan ennen varsinaista välipohjarakenteen rakentamista. Vaihtoehtoratkaisuissa reunapilarit asennetaan myös etukäteen. Pilarien rakentamisen jälkeen pysäköintilaitoksen alatasolle tehdään asfalttipinta, jonka jälkeen varsinaisen välipohjatyö voidaan aloittaa. Vertailurakenteen pilarityö tutkittavalla alueella on katsottu kestävän 5 työvuoraa, kun vaihtoehtoisten rakenteiden osalta pilarien asennukseen on suunniteltu kuluvan 2 työvuoraa.

Työmaan käyttö- ja yhteiskustannuksista suoraan aikasidonnaisia on arvioitu olevan 65 %. Kunkin ratkaisun läpimenoaika suhteutetaan koko pysäköintilaitoksen välipohjaalaan ja työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset suhteutetaan sen mukaan kullekin ratkaisulle. Välipohjarakenne on koko hankkeen aikataulussa kriittisellä polulla. Esimerkiksi LVIS-töiden aloitukset ovat riippuvaisia välipohjarakenteen valmistumisesta. Välipohjarakenteen nopeampi valmistuminen nopeuttaa täten koko hankkeen valmistumista ja vaikuttaa näin työmaan käyttö- ja yhteiskustannuksiin.

Mikäli välipohjarakenteen korkeus eroaa vertailurakenteen korkeudesta, jolloin louhintamäärät muuttuvat, on laskettu periaatteellinen louhintatöiden kustannusero. Muihin kustannuksiin kuuluvat myös toiminnallisesta palomitoituksesta mahdollisesti aiheutuvat lisäkulut. Tutkimuksen alussa tarkoitus oli myös vertailla eri ratkaisuiden anturoiden kustannuksia, mutta niiden kustannuserot ilmenivät niin pieniksi, että vertailua ei katsottu merkitykselliseksi.

Kalustokustannuksissa otetaan huomioon välipohjarakenteeseen liittyvät tuenta- ja muottikalusto sekä nostokalusto. Elementtien hinnoissa on mukana kuljetuksen kustannukset ja betonin hinnassa on kuljetuksen ja pumppauksen kustannukset.

## 6.1.2 QSE-vertailu

QSE-analyysissa ratkaisuille on annettu + -merkit kustakin analyysin osa-alueesta. Plusmerkit jakautuvat yhdestä viiteen. Tarkemmat QSE-analyysit ovat liitteissä. Laadullisissa arvioinneissa tärkeimmiksi osatekijöiksi arvioitiin vesitiiviys, liitokset, työvaiheiden määrä ja työvirheiden todennäköisyys, sekä rakennusosien yleinen laatu. Työturvallisuuden osalta vertailuun otettiin mukaan kompastuminen, silmävamma, puristuminen ja putoaminen. Ympäristöolosuhteiden osatekijöiksi valittiin työmaa logistiikka, työskentely, rakenteiden toiminta ja paloturvallisuus sekä ilmanlaatu.

## 6.2 Vertailut

### 6.2.1 Vertailurakenne: Jälkijännitetty paikallavalettu palkki-laattarakenne

#### Yleistä

Jälkijännitettyä paikallavalettua rakennetta on käytetty pysäköintilaitoksissa ja erityisesti maanalaisissa pysäköintilaitoksissa vuosia ja menetelmä on hioutunut lähes täydelliseksi. Rakenteessa ei juuri ole optimointimahdollisuuksia kustannusten eikä rakennusajan nopeuttamisen suhteen. Paikallavalaminen on vallitseva rakentamistapa, jota tilaajat, urakoitsijat ja suunnittelijat suosivat valittaessa maanalaisen pysäköintilaitoksen välipohjarakennetta.

Paikallavalaminen on turvallinen rakentamistapa noususuhdanteessa, jolloin elementtirakentamisen kustannukset nousevat ja toimitusajat pitenevät.

#### Ajalliset- ja kustannuslaskelmat

Vertailurakenteesta laskettiin samoilla periaatteilla kuin vaihtoehtoista rakenteistakin työmenekkien mukaan tehtävien kestot ja Lemminkäinen Infra Oy:n hintatietoja käyttäen kustannukset. Vertailurakenteen ajalliset - ja kustannusvertailut on esitetty taulukossa 2.

Ajallinen vertailu		Kustannusvertailu					
Läpimenoaika (tv)	Työtehotuntia (tth)	€/välipohjaneliö	Työkustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Materiaalikulut (€/m <sup>2</sup> )	Kalustokustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Muut kustannukset (€/m <sup>2</sup> )
38 + 5	3390	148 (183)	35,9	87,2	17,7	-	-

Taulukko 2. Vertailurakenteen ajalliset- ja kustannusvertailut.

Pilareiden rakennustyöt on limitetty varsinaisen välipohjatyön kanssa siten, että pilareiden rakentamisesta johtuen välipohjarakenteen kokonaisrakentamisaika pidentyy 5 työvuoraa. Välipohjan rakennusaika on 38 työvuoraa, jolloin koko rakenteen läpimenoaika on 43 työvuoraa. Välipohjan neliöhinta on 147,8 €/m<sup>2</sup>. Suluissa oleva välipohjaneliöhinta on kohteessa toteutetun välipohjan todellinen hinta.

Työntekijätunteja vertailurakenteessa on 3391, mikä on yli kaksinkertainen verrattuna Parma Oy:n elementtivaihtoehtoon. Paikalla rakennettaessa työtunteja on enemmän verrattuna elementtirakenteisiin, joissa rakennusosat ovat valmistettu tehtaassa ja vain asennus suoritetaan työmaalla.

### Tuotannon häiriöherkkyys

Vertailurakenteen häiriöherkkyys on pieni. Paikallavalumenetelmää pidetään yleisesti huomattavasti vähemmän häiriöherkkänä kuin elementtirakentamista. Aikataulu toteutuneessa kohteessa on verrattain kireä. Viikonloppupäivinä on suoritettu esimerkiksi jännitystöitä.

### QSE-analyysi

Laadun kannalta jälkijännitetyn rakenteen suurimpana etuna on rakenteen vesitiiviys ja sitä kautta tulevat hyvät säilyvyysominaisuudet. Paikallavalettujen pintojen laatu suhteessa elementtirakenteiden pintoihin on heikompi. Rakennetta on käytetty useissa vastaavissa kohteissa ja ongelmakohdat on löydetty ja ratkaistu, joten tältä osin rakenne on laadullisesti hyvä. Vertailurakenteen QSE-analyysi on taulukossa 3.

QSE-ANALYYSI: VERTAILURAKENNE		
<b>LAATU</b>		3,75
	Vesitiiveys	+++++
	Liitokset	++++
	Työvaiheet	+++
	Rakennusosat	+++
<b>TYÖTURVALLISUUS</b>		2,25
	Kompastuminen	++
	Sinkoaminen	++
	Puristuminen	+++
	Putoaminen	++
<b>YMPÄRISTÖ</b>		4,5
	Työmaalogistiikka	+++++
	Työskentely	++++
	Ilmanlaatu	++++
	Paloturvallisuus	+++++
<b>Yhtensä</b>	<b>Yhtensä</b>	10,5

Taulukko 3. Vertailurakenteen QSE-analyysi.

Työturvallisuudessa suurimmat riskitekijät on putoaminen, kompastuminen, silmävammat betonoinnissa sekä holvimuotin kaatuminen. Työntekijätuntien suuri määrä vaikuttaa todennäköisyyden kautta työturvallisuuteen. Enemmän tehtyjä tunteja aiheuttaa enemmän mahdollisuuksia sattua työtapaturma. Betoni- ja pumppuautojen pakokaasupäästöt maanalaisissa tiloissa on myös otettava huomioon, sillä ilma vaihtuu tunnelissa huonosti. Tässä ratkaisussa pakokaasupäästöjä aiheuttavaa kalustoa ei ole merkittävästi.

Negatiiviset olosuhdevaikutukset eivät vertailurakenteella ole merkittäviä. Ahtaat tunneliolosuhteet eivät vaikeuta merkittävästi muottityötä, raudoitusta eivätkä betonointia. Nostojen vaikeutuminen johtaa siihen, että rakennusosia ja materiaaleja on liikuteltava käsin. Logistiikan kannalta tunnelissa rakentaminen ei myöskään tuo merkittäviä ongelmia. Olosuhteet ovat betonoinnin kannalta ihanteelliset, vuodenajan vaihtelut eivät vaikeuta betonointia tunneliolosuhteissa.

## 6.2.2 VE1: Jännitetty teräsbetonipalkki – ripalaatta (Parma Oy)

### Yleistä

Yleisesti elementtirakentamisen etuna on pidetty sen riippumattomuutta vuodenaikojen aiheuttamista olosuhteista. Maan päällä rakennettaessa elementtirakentamisen etuna voidaan pitää sitä, että elementtirakenteinen pysäköintilaitos voidaan rakentaa välittämättä talviolosuhteista, pintabetonointi tulee kuitenkin mielellään suorittaa leudompaan aikaan. Maan alla rakennettaessa tämä etu häviää.

Tämän ratkaisun ongelma, kuten muidenkin betonielementtiratkaisuiden ongelma korkeasuhteissa, on elementtien hintojen nousu ja toimitusaikojen pidentyminen.

### Ajalliset- ja kustannuslaskelmat

Aikataulussa tahdistava tekijä on autonostureiden työsaavutus. Nostureiden työsaavutukseksi on arvioitu yhdessä työvuorossa yksi pilarilinja, palkkeineen, reunaelementteineen ja laattoineen. Rakenteen läpimenoajaksi on suunniteltu 31 työvuoroa. Työtehotunteja ratkaisussa on 1533. Välipohjarakenteen kustannuslaskelmasta saatu neliöhinta on 171,2 €/m<sup>2</sup>. Aikasidonnaisista kustannuksista säästöä saadaan 92 134 €, eli 26,3 €/m<sup>2</sup>, jolloin neliöhinta on 144,9 €/m<sup>2</sup>. Kallioprofiilin kasvattamisen teoreettinen kustannusvaikutus on 2,3 €/m<sup>2</sup>. VE1:n ajalliset- ja kustannusvertailut on esitetty taulukossa 4.

Ajallinen vertailu		Kustannusvertailu					
Läpimeno-aika (tv)	Työtehotuntia (tth)	€/välipohjaneliö	Työkustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Materiaalikus-tannukset (€/m <sup>2</sup> )	Kalustokus-tannukset (€/m <sup>2</sup> )	Työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Muut kustannukset (€/m <sup>2</sup> )
31	1533	171,2	16,2	144,7	10,3	-26,3	2,3

Taulukko 4. VE1:n ajalliset- ja kustannusvertailut.

### Tuotannon häiriöherkkyys

Häiriöherkkyys on suuri vertailurakenteeseen verrattuna. Rakennusosat ovat suuria ja toimitusketju on häiriöherkkyiden kannalta ongelmallinen. Elementtirakenteen valmistuminen aikataulussa on hyvin riippuvainen elementtitoimituksista ja nostokaluston toimivuudesta ja työsaavutuksesta. Myös järeiden nosturiautojen saatavuus voi olla haasteellista.

### QSE-analyysi

Laadun kannalta elementtirakentamisen suurena haasteena voidaan pitää vedenpitävyyden hallintaa. Vaikka menetelmät ovat kehittyneet ja rakenne on vesitiivis, ei vesitiiviys ole yhtä hyvää kuin jännitetyllä rakenteella. Vesitiiveyden aikaansaaminen esikorrotaamisella on myös herkempi työvirheille kuin jälkijännitysmenetelmä. Maan alla veden ja suojen kulkeutuminen pysäköintitasoille ei ole niin voimakasta kuin maan päällä, joten maan alla ero jälkijännitettyyn rakenteeseen hieman tasoittuu. Silti säilyvyyden kannalta jälkijännitetty rakenne on Parman ratkaisua parempi.

QSE-ANALYYSI: VE1		
<b>LAATU</b>		3,5
	Vesitiiveys	+++
	Liitokset	+++
	Työvaiheet	++++
	Rakennusosat	++++
<b>TYÖTURVALLISUUS</b>		3
	Kompastuminen	+++
	Sinkoaminen	++++
	Puristuminen	++
	Putoaminen	+++
<b>YMPÄRISTÖ</b>		3,25
	Työmaalogistiikka	++
	Työskentely	+++
	Ilmanlaatu	++
	Paloturvallisuus	+++++
<b>Yhtensä</b>	<b>Yhtensä</b>	9,75

Taulukko 5. Parman ratkaisun QSE-analyysi.

Työturvallisuuden kannalta elementtiasennuksessa ja muissa työvaiheissa ei ole paljon työtapaturmille alttiita työvaiheita. Elementtiasennus maanalaisissa tiloissa voi olla jopa turvallisempaa kuin maanpäällä rakennettaessa. Elementtejä ei nosteta työntekijöiden yli kuten maanpäällä rakentaessa helposti käy. Asennus on verraten hidasta ja tarkkaa. Tulitöitä ei kuulu tähän ratkaisuun, eikä muitakaan työturvallisuuden kannalta vaikeita työvaiheita ole. Putoamissuojien asentaminen elementtiasennuksen edetessä on tärkeää että muita työvaiheita tekevät eivät putoa holvilta. Elementtien tukeminen ja asennus ovat työturvallisuuden kannalta herkimmät työvaiheet. Betoniroiskeiden aiheuttamat silmävammat ovat betonoinnin suurimmat ongelmat. Puristuminen elementtien, ajoneuvojen tai asennuskaluston väliin on vakavin mahdollinen työtapaturma.

Raskaiden ja pitkien palkkien logistiikka on tunneliolosuhteissa vaikeaa, mutta ratkaistavissa. Tunneliolosuhteet myös vaikeuttavat elementtien asennusta. Palkkien painosta johtuen asennuksessa joudutaan käyttämään kahta autonosturia. Rakennetta on käytetty aikaisemmin maanpäällisissä pysäköintilaitoksissa, jossa se on todettu toimivaksi ratkaisuksi. Maan alle rakennettaessa haastetta tuo työmaalogistiikan ja asennuksen järjestäminen toimivaksi.

### **6.2.1 VE2: Teräspalkki – jälkijännitetty liittolevylaatta (Ruukki Construction)**

#### **Yleistä**

Toinen vaihtoehtoinen ratkaisu on Ruukki Constructionin teräspalkki – liittolevylaattarakenne jälkijännitettynä. Tätä rakennetta ei ole Suomessa pysäköintilaitoksissa käytetty. Rakenteen suurin etu muihin ratkaisuihin nähden on sen keveys. Tuotantoteknisesti rakenne eroaa paikalla valetusta ratkaisusta siinä, että liittolevy toimii rakenteen osana sekä muottina, jolloin yksi työvaihe paikallavalutekniikkaan verrattuna jää pois. Kirjallisuudessa teräsrakenteiden huolto- ja ylläpitokustannukset mainitaan betonirakenteita korkeammaksi.

#### **Ajalliset- ja kustannuslaskelmat**

Myös Ruukin ratkaisussa tahdistava tekijä on rungon asennus. Asennuksessa käytetään yhtä autonosturia ja raudoitteet ja punokset nostetaan holville kurottajaa apuna käyttäen. Asennusjärjestys runkorakenteiden osalta on sama kuin Parman ratkaisussa. Rungon ja liittolevyasennuksen kesto on suunniteltu kestävän 23 työvuoroa ja koko rakenteen läpimenoaika 34 työvuoroa. Raudoitus ja jännepunostyö on tahdistettu runkotyön kanssa. Ratkaisun välipohjan kustannuslaskelmasta neliöhinnaksi saadaan 175,5 €/m<sup>2</sup>. Aikasidonnaisista kustannuksista säästöä saadaan 72900 €, joka on neliöhintana 20,8 €/m<sup>2</sup>.

Aikasidonnaiset kustannukset vähennettynä rakennusteknisistä kustannuksista neliöhinnaksi tulee 154,7 €/m<sup>2</sup>. Ajalliset- ja kustannusvertailut on esitetty taulukossa 6.

Ajallinen vertailu		Kustannusvertailu					
Läpimeno-aika (tv)	Työtehotuntia (tth)	€/välipohjaneliö	Työkustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Materiaalikustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Kalustokustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Muut kustannukset (€/m <sup>2</sup> )
34	2144	175,5	36,6	130,6	8,3	-20,6	1,2 (8,4)

Taulukko 6. VE2:n ajalliset- ja kustannusvertailut.

### Tuotannon häiriöherkkyys

Yhdistelmärakenteen etuna voidaan pitää rakennusosien keveyttä verrattuna muihin vaihtoehtorakenteisiin. Häiriöherkkyys pienenee, koska rakennusosia voidaan kuljettaa työkohteeseen suurempia määriä kerralla. Asennustyö helpottuu, koska teräspalkin paino suhteessa teräsbetonipalkkiin on noin 1 : 6. Rakennetta ei ole aikaisemmin tehty pysäköintilaitoksissa, liittyy siihen pientä epävarmuutta. Rakenne tulee testata pilottihankkeessa. Vallitseva rakennustapa ei suosi tätä rakennetta. Liittolaattatyön ja runkoasennuksen edetessä töiden yhteensovittaminen raudoituksen, jännepunostyön ja tuennan kanssa on haasteellista ja voi aiheuttaa häiriöitä.

### QSE-analyysi

Ruukin ratkaisussa rakenteiden paloteknisessä suunnittelussa on käytetty toiminnallista palomitoitusta. Rakenteiden palosuojaus on suunniteltu käyttäen hyväksi sprinklerijärjestelmää. Tässä tutkimuksessa ei suoritettu palosimulointia kohteesta, joten sprinklerijärjestelmää ei mitoitettu tarkasti. Kohteessa on automaattinen sprinklerijärjestelmä sprinkleriluokassa OH2, normaalsprinkleriluokka, ryhmä 2. Olemassa olevan sprinkleriluokan vedentuotto (5 m/min) saattaa riittää toiminnallisen palomitoituksen saavuttamiseksi, mutta se vaatii lisätutkimuksia. Tutkimuksessa on laskettu paljonko sprinklerijärjestelmän muuttaminen sprinkleriluokkaan HHP2, raskas sprinkleriluokka 2. Muuttaminen aiheuttaa kohteessa sprinkleriputkiston kasvattista veden mitoitusvirtaaman kasvaessa sekä pumppujen koon kasvattamista. Lisäksi kohteessa on toisena vesilähteenä allaspumppaamo, jonka kokoa tulee kasvattaa 200 kuutiosta 315 kuutioon. Vesilähteen vaikutus sprinklerijärjestelmän kustannuksiin on merkittävä, suunnittelu on lisäksi erittäin tapauskohtaista. Kaupungin vesilähteen vedenpaineen merkitys kustannuksiin on voimakas. Mikäli kaupungin vesilähteestä saadaan riittävästi volyymia, ei ylimääräistä sprinkleriallasta välttämättä tarvita. On huomioitava siis myös se mahdollisuus, että lisäkustannuksia toiminnallisesta palomitoituksesta ei synny.

Teräsrakenteet eivät ole toimitusten ja kustannusten nousun suhteen niin herkkiä suhdanteille kuin teräsbetonirakenteet. Teräksen hinnan vaikutus kokonaiskustannuksiin on kuitenkin huomioon otettava seikka.

Laadun kannalta rakenteen vesitiiviys on keskeistä. Jälkijännittämisen johdosta vesitiiviys on tässä ratkaisussa turvallinen. Rakenteessa ei myöskään ole useita eri työvaiheita, joten työvirheen todennäköisyys on pieni. Rakenne on uusi pysäköintilaitoksissa, jolloin suunnittelussa voi ilmetä odottamattomia ongelmakohtia. Pysäköintilaitoksissa rakenteiden pinnat joutuvat kovaan rasitukseen. Välipohjarakenteiden yläpuoliset pinnat ovat kaikissa rakenteissa samanlaiset, mutta teräsrakenteiden ja betonirakenteiden pystyrakenteet ja välipohjarakenteen alapinnat ovat erilaiset. Pysty- ja vaakarakenteet altistuvat iskemille ja törmäyksille. Betonipinnat ovat kestävämpiä kuin teräsrakenteiset pinnoitetut pinnat. Ruukin ratkaisussa rakenteiden korroosiosuojaus hoidetaan sinkityksellä. Korroosiosuojauksen ja maalauksen iskunkestävyys ei ole yhtä kestävä kuin betonirakenteiden iskunkestävyys. Ruukin ratkaisun QSE-analyysi on taulukossa 7.

QSE-ANALYYSI: VE2		
<b>LAATU</b>		3,5
	Vesitiiveys	++++
	Liitokset	+++
	Työvaiheet	+++
	Rakennusosat	++++
<b>TYÖTURVALLISUUS</b>		2,25
	Kompastuminen	++
	Sinkoaminen	++
	Puristuminen	+++
	Putoaminen	++
<b>YMPÄRISTÖ</b>		3
	Työmaalogistiikka	++++
	Työskentely	+++
	Ilmanlaatu	+++
	Paloturvallisuus	+++
<b>Yhtensä</b>	<b>Yhtensä</b>	8,75

Taulukko 7. Ruukin ratkaisun QSE-analyysi.

Jännittämistyö on myös kriittinen niin työturvallisuuden kuin laadunkin kannalta. Betonoinnissa on kiinnitettävä erityistä huomiota betonin tiivistämiseen, jotta betoniin ei jää koloja, jotka voivat jännittämisessä aiheuttaa rakenteen turmeltumista. Myös ankkureiden kestävyys on kiinnitettävä huomiota.

Työturvallisuuden kannalta tässä ratkaisussa keskeisiä työvaiheita ovat teräs- ja liittorakenteiden asennus ja putoamissuojauksen huolellinen hoitaminen. Liittolevyjen tukeminen ja kiinnittäminen sekä muihin betonirakenteisiin nähden suurempi tulitöiden osuus ovat työturvallisuuden kannalta kriittisiä. Raudoitus- ja betonointityötä on elementtiratkaisuihin verrattuna enemmän, joten näille työvaiheille ominaiset työturvallisuusriskit, kuten betoniroiskeet silmiin ja kompastuminen holvilla ovat myös kriittisiä.



## 6.2.2 VE3: Jännitetty teräsbetonipalkki – ontelolaatta

### Yleistä

Kolmas vaihtoehtoinen välipohjaratkaisu on jännitetty teräsbetonipalkki – ontelolaatta. Ratkaisun suurin ero Parman ratkaisuun että rakennetta ei ole esikorotettu, jolloin palkit ovat huomattavasti järeämpiä. Esikorotuksen puuttuminen aiheuttaa myös rakenteen vedenpitävyyden aikaansaamiseksi sen, että laataston päälle on suunniteltu kermieristys, jolla rakenteen vedenpitävyys on ratkaistu. Polystyreeni toimii laakerikerroksena pinta-valun ja ontelolaataston välillä. Rakennetta on käytetty pysäköintilaitosten välipohjissa aikaisemmin.

Tämän ratkaisun suurin ongelma on palkkien suuri paino, joka vaikeuttaa logistiikkaa ja elementtien asennusta. Lisäksi työvaiheiden suuri määrä johtaa työtehotuntien suureen määrään, joten työvirheiden ja työtapaturmien todennäköisyys kasvaa.

### Ajalliset- ja kustannuslaskelmat

Aikataulussa tahdistava tekijä on autonostureiden työsaavutus. Nostureiden työsaavutukseksi on arvioitu yhdessä työvuorossa yksi pilarilinja, palkkeineen ja laattoineen. Rakenteen läpimenoajaksi on suunniteltu 31 työvuorua. Ontelolaattojen suuri määrä aiheuttaa paljon toistoja asennukseen, mikä voi osoittautua arvioitua hitaammaksi. Työtehotunteja ratkaisussa on 2144. Laatan eristystyöt nostavat työtehotuntien määrän suhteellisen korkeaksi. Välipohjan kustannuslaskelmasta saatu neliöhinta on 187,1 €/m<sup>2</sup>. Ratkaisussa on pintalaatan rauditus suunniteltu ruostumattomasta teräksestä, mikä nostaa merkittävästi rakenteen kustannuksia. Aikasidonnaista kustannussäästöä saadaan 92 134 €, eli 26,3 €/m<sup>2</sup>, jolloin neliöhinta on 160,8 €/m<sup>2</sup>. VE3:n ajalliset- ja kustannusvertailut on esitetty taulukossa 8.

Ajallinen vertailu		Kustannusvertailu					
Läpimeno-aika (tv)	Työtehotuntia (tth)	€/välipohjaneliö	Työkustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Materiaalikustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Kalustokustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Muut kustannukset (€/m <sup>2</sup> )
33	2144	187,1	19,3	155,8	12,0	-26,3	6,9

Taulukko 8. VE3:n ajalliset- ja kustannusvertailut.

### Tuotannon häiriöherkkyys

Ratkaisun häiriöherkkyys on suuri vertailurakenteeseen verrattuna. Jännitetyt palkit ovat suuria, erittäin painavia ja toimitusketju on häiriöherkkyiden kannalta ongelmallinen. Elementtirakenteen valmistuminen aikataulussa on hyvin riippuvainen elementtitoimiuksista ja nostokaluston toimivuudesta ja työsaavutuksesta. Myös järeiden nosturiauto-

jen saatavuus voi olla ajoittain vaikeaa. Tahdistettavien työvaiheiden suurempi määrä vaikuttaa myös häiriöherkkyyteen negatiivisesti.

### QSE-analyysi

Laadun kannalta ratkaisun suurin haaste on rakenteen tiiviys. Vaikka rakenne on suunniteltu vesitiiviiksi, pääse vesi halkeiluista betonirakenteeseen sisään ja näin rapauttaa ajan myötä rakennetta. Rakennusosien laatu on lähtökohtaisesti hyvä. Elementit ovat valmistettu sisällä hyvissä olosuhteissa. Asiakkaan kokemaa laatua ei ontelolaattojen osalta yllä ripalaatan sileän pinnan tasolle. Vaihtoehto 3:n QSE-analyysi on esitetty taulukossa 9.

QSE-ANALYYSI: VE3		
<b>LAATU</b>		2,5
	Vesitiiveys	++
	Liitokset	+++
	Työvaiheet	++
	Rakennusosat	+++
<b>TYÖTURVALLISUUS</b>		2,5
	Kompastuminen	++
	Sinkoaminen	++++
	Puristuminen	++
	Putoaminen	++
<b>YMPÄRISTÖ</b>		2,5
	Työmaalogistiikka	+
	Työskentely	++
	Ilmanlaatu	++
	Paloturvallisuus	++++
<b>Yhtensä</b>	<b>Yhtensä</b>	7,5

Taulukko 9. VE3:n QSE-analyysi

Työturvallisuuden kannalta elementtiasennuksessa ja muissa työvaiheissa ei ole paljon työtapaturmille alttiita työvaiheita. Elementtiasennus maanalaisissa tiloissa voi olla jopa turvallisempaa kuin maanpäällä rakennettaessa. Elementtejä ei nosteta työntekijöiden yli kuten maanpäällä rakentaessa helposti käy. Asennus on verraten hidasta ja tarkkaa. Tulitöitä ei kuulu tähän ratkaisuun, eikä muitakaan työturvallisuuden kannalta haastavia työvaiheita ole. Putoamissuojien asentaminen elementtiasennuksen edetessä on tärkeää, että muita työvaiheita tekevät eivät putoa holvilta. Elementtien tukeminen ja asennus ovat työturvallisuuden kannalta herkimmit työvaiheet. Betoniroiskeiden aiheuttamat silmävammat ovat betonoinnin suurimmat ongelmat. Puristuminen elementtien, ajoneuvojen tai asennuskaluston väliin on vakavin mahdollinen työtapaturma.

Ympäristöolosuhteet tunnelissa ovat tämän ratkaisun kannalta heikot. Palkit ovat erittäin raskaita, vaikeasti liikuteltavia. Asennuksessa tarvitaan kahta autonosturia, mikä

tekee asennuspaikasta entisestään ahtaamman ja ilmanlaatu on myös huono autonostureiden pakokaasujen johdosta.

### 6.2.3 VE4: Jännitetty teräsbetonipalkki – TT-laatta

#### Yleistä

Neljännen vaihtoehdon suurin ongelma on sama kuin kolmannenkin vaihtoehdon, palkin oman painon suuruus. Ratkaisussa vedenpitävyys on suunniteltu kermein, kuten edellisessä vaihtoehdossa. Polystyreenikerros toimii laakerikerroksena laataston ja pintavalun välissä.

#### Ajalliset- ja kustannuslaskelmat

Aikataulussa tahdistava tekijä on autonostureiden työsaavutus, asennus suoritetaan käyttäen kahta autonosturia. Nostureiden työsaavutukseksi on arvioitu yhdessä työvuorossa yksi pilarilinja, palkkeineen ja laattoineen. Rakenteen läpimenoajaksi on suunniteltu 31 työvuoroa. TT-laattojen suuremmasta koosta johtuen toistojen määrä on tässä vaihtoehdossa pienempi, toisaalta TT-laattojen ripojen korkeus hidastaa tunneliprofiilissa laitimmaisten laattojen asennusta. Työtehotunteja ratkaisussa on 1711. Laatan eristystyöt nostavat työtehotuntien määrän suhteellisen korkeaksi. Välipohjan kustannuslaskelmas-  
ta saatu neliöhinta on 206,6 €/m<sup>2</sup>. Ratkaisussa on pintalaatan raudoitus suunniteltu ruostumattomasta teräksestä, mikä nostaa merkittävästi rakenteen kustannuksia. Aikasidonnaista kustannuksista säästöä saadaan 85 553 €, eli 24,4 €/m<sup>2</sup>, jolloin neliöhinta on 182,2 €/m<sup>2</sup>. VE4:n ajalliset- ja kustannusvertailut on esitetty taulukossa 10.

Ajallinen vertailu		Kustannusvertailu					
Läpimeno- aika (tv)	Työtehotuntia (tth)	€/välipohja- neliö	Työkustan- nukset (€/m <sup>2</sup> )	Materiaalikus- tannukset (€/m <sup>2</sup> )	Kalustokus- tannukset (€/m <sup>2</sup> )	Työmaan käyttö- ja yhteiskustan- nukset (€/m <sup>2</sup> )	Muut kustannuk- set (€/m <sup>2</sup> )
33	1711	206,6	17,1	180,0	9,5	-24,4	6,9

Taulukko 10. VE4:n ajalliset- ja kustannusvertailut.

#### Tuotannon häiriöherkkyys

Ratkaisun häiriöherkkyys on suuri vertailurakenteeseen verrattuna. Jännitetyt palkit ovat suuria, erittäin painavia ja toimitusketju on häiriöherkkyiden kannalta ongelmallinen. Elementtirakenteen valmistuminen aikataulussa on hyvin riippuvainen elementtitoimituksista ja nostokaluston toimivuudesta ja työsaavutuksesta. Myös järeiden nosturiautojen saatavuus voi olla ajoittain haastavaa. Tahdistettavien työvaiheiden suurempi määrä vaikuttaa myös häiriöherkkyteen negatiivisesti.

## QSE-analyysi

Laadun kannalta ratkaisun suurin haaste on rakenteen tiiviys. Rakenteen vesitiiviys on suunniteltu kermeillä. Vesi pääsee tunkeutumaan rakenteeseen halkeiluista ja näin rapauttaa ajan myötä rakennetta. Rakennusosien laatu on lähtökohtaisesti hyvä. Elementit ovat valmistettu sisällä hyvissä olosuhteissa. Asiakkaan kokema laatu TT-laattojen osalta on parempaa kuin ontelolaattojen osalta. VE4:n QSE-analyysi on taulukossa 11.

QSE-ANALYYSI: VE4		
<b>LAATU</b>		2,5
	Vesitiiveys	++
	Liitokset	++
	Työvaiheet	+++
	Rakennusosat	+++
<b>TYÖTURVALLISUUS</b>		3
	Kompastuminen	+++
	Sinkoaminen	++++
	Puristuminen	++
	Putoaminen	+++
<b>YMPÄRISTÖ</b>		2,5
	Työmaa logistiikka	+
	Työskentely	++
	Ilmanlaatu	++
	Paloturvallisuus	++++
<b>Yhtensä</b>	<b>Yhtensä</b>	8

Taulukko 11. VE4:n QSE-analyysi.

Työturvallisuuden kannalta elementtiasennuksessa ja muissa työvaiheissa ei ole paljon työtapaturmille alttiita työvaiheita. Asennus on verraten hidasta ja tarkkaa. Putoamissuojien asentaminen elementtiasennuksen edetessä on tärkeää, jotta muita työvaiheita tekevät eivät putoa holvilta. Elementtien tukeminen ja asennus ovat työturvallisuuden kannalta herkimvät työvaiheet. Betoniroiskeiden aiheuttamat silmävammat ovat betonoinnin suurimmat ongelmat. Puristuminen elementtien, ajoneuvojen tai asennuskaluston väliin on vakavin mahdollinen työtapaturma.

Ympäristöolosuhteet tunnelissa ovat tämän ratkaisun kannalta heikot. Palkit ovat erittäin raskaita ja vaikeasti liikuteltavia. Lisäksi laitimmaisten TT-laattojen asennus on erittäin ahdasta. Asennuksessa tarvitaan kahta autonosturia, mikä tekee asennuspaikasta entistä ahtaamman ja ilmanlaatu on myös huono autonostureiden pakokaasujen johdosta.

## 6.2.4 VE5:Teräspalkki–kuorilaatta, liittorakenteena

### Yleistä

Viimeinen vaihtoehtoinen ratkaisu on HEB550-teräspalkki, johon on tukeutunut 120 mm paksut kuorilaatat. Rakenne on suunniteltu liittorakenteena. Tässä ratkaisussa, kuten Ruukin ratkaisussa, on rakenteiden palomitoituksessa sovellettu toiminnallista palomitoitusta. Rakenteen palosuojaus on suunniteltu sprinklerisumutuksella. Toiminnallisen palomitoituksen käyttäminen maanalaisissa tiloissa kaipaa vielä lisätutkimuksia. Mikäli kohteeseen suunniteltu sprinklereiden vedentuotto riittää toiminnalliseen palomitoitukseen teräsrakenteiden osalta, ei lisäkustannuksia tule. Mikäli vedentuotto ei riitä, aiheutuu lisäkustannuksia putkilinjojen kasvattamisesta sekä pumppujen kapasiteetin suurentamisesta.

### Ajalliset- ja kustannuslaskelmat

Aikataulussa tahdistava tekijä on autonosturin työsaavutus. Teräspalkin paino verrattuna teräsbetonipalkkiin on huomattavan paljon pienempi, joten palkin asennus voidaan suorittaa yhdellä autonosturilla. Rungon pystytyksen läpimenoajaksi on suunniteltu 27 työvuoroa ja koko rakenteen läpimenoajaksi 33 työvuoroa. Kuorilaattojen suuresta määrästä johtuen rungon asennuksessa kuluu muita ratkaisuita enemmän aikaa. Työvaiheiden määrä ei ratkaisussa ole muihin verrattuna suuri. Laatan raudoitus on tahdistettu rungon asennuksen kanssa. Työtehotunteja ratkaisussa on 2006. Kustannuslaskelmasta ratkaisun neliöhinnaksi saadaan 189,6 €/m<sup>2</sup>. Rakennusajan lyhentyessä aikasidonnaiset kustannukset tuovat säästöä 20,6 €/m<sup>2</sup>, jolloin neliöhinta on 169,0 €/m<sup>2</sup>. Vaihtoehdon ajalliset- ja kustannuslaskelmat on esitetty taulukossa 12.

Ajallinen vertailu		Kustannusvertailu					
Läpimeno-aika (tv)	Työtehotuntia (tth)	€/välipohjaneliö	Työkustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Materiaalikustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Kalustokustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset (€/m <sup>2</sup> )	Muut kustannukset (€/m <sup>2</sup> )
33	2006	189,6	21,4	160,4	7,8	-20,6	1,1

Taulukko 12. VE5:n ajalliset- ja kustannusvertailut

### Tuotannon häiriöherkkyys

Ratkaisu on häiriöherkkyttä vertaillessa samalla tasolla Ruukin vaihtoehdon kanssa. Ratkaisussa ei ole häiriöherkkiä työvaiheita, eikä työvaiheita ole monta. Lisäksi rakenteet ovat verraten keveitä.

## QSE-analyysi

Laadun kannalta tämänkin ratkaisun suurin ongelma on rakenteen tiiviys. Rakenteeseen ei ole suunniteltu vedenpitävyyden varmistamiseksi kermieristystä, eikä rakenne ole jännitetty. Vesi pääsee tunkeutumaan rakenteeseen halkeiluista ja näin rapauttaa ajan myötä rakennetta. Rakennusosien laatu on lähtökohtaisesti hyvä. Elementit ovat valmistettu sisällä hyvissä olosuhteissa. Vaihtoehdon QSE-analyysi on taulukossa 13.

QSE-ANALYYSI: VE5		
<b>LAATU</b>		2,5
	Vesitiiveys	++
	Liitokset	++
	Työvaiheet	+++
	Rakennusosat	+++
<b>TYÖTURVALLISUUS</b>		2,25
	Kompastuminen	++
	Sinkoaminen	+++
	Puristuminen	++
	Putoaminen	++
<b>YMPÄRISTÖ</b>		3,25
	Työmaa logistiikka	+++
	Työskentely	+++
	Ilmanlaatu	++
	Paloturvallisuus	++++
<b>Yhtensä</b>		8

Taulukko 13. VE5:n QSE-analyysi.

Työturvallisuuden kannalta elementtiasennuksessa ja muissa työvaiheissa ei ole paljon työtapaturmille alttiita työvaiheita. Elementtien tukeminen ja asennus ovat työturvallisuuden kannalta herkimmät työvaiheet. Betoniroiskeiden aiheuttamat silmävammat ovat betonoinnin suurimmat ongelmat. Puristuminen elementtien, ajoneuvojen tai asennuskaluston väliin on vakavin mahdollinen työtapaturma.

Ympäristöolosuhteet tunnelissa ovat tämän ratkaisun kannalta verraten hyvät. Palkit ovat teräsbetonipalkkeja huomattavasti keveämmät. Asennus suoritetaan yhdellä autonosturilla, joten ilmanlaatu tunnelissa on hyvä.

## 6.2.5 Herkkyystarkastelu

Tuntihintojen muutoksella eri rakenteiden keskinäiseen järjestykseen ei tule suuria muutoksia, vaikka rakenneratkaisuiden välillä työmäärä vaihtelee suuresti. Paikallarakentamisessa työntekijätuntien määrä elementtiratkaisuun verrattuna on kaksinkertainen. Tuntihintojen 20 % nousu lisää kokonaiskustannuksia vertailurakenteessa 5 %, kun taas Parman rakenteessa, jossa tehtyjä työtunteja on puolet vähemmän tuntihintojen 20 % nousu lisää kokonaiskustannuksia 2 %. Muut rakenteet sijoittuvat tuntihintatarkastelussa näiden kahden rakenteen väliin.

Teräksen ja elementtien hinnanmuutokset saavat suurinta vaihtelua rakenteiden keskinäiseen järjestykseen herkkyystarkastelussa. Tällä hetkellä teräksen maailmanmarkkinahinta on suhteellisen alhainen, eikä näköpiirissä ole että teräksen hinta tästä tasosta enää laskee. Hinnan nousu on todennäköisempää. Herkkyystarkastelussa teräksen hinnan 20 % nousu nostaa Ruukin ratkaisun kokonaiskustannuksia 10,8 %.

Rakentamisen noususuhdanteessa elementtien hinnat nousevat. Korkeasuhdanteessa elementtien kysyntä kasvaa, jolloin toimitusajat ja elementtien hinnat nousevat. Herkkyystarkastelussa elementtien hinnan nousu 20 % nostaa elementtirakenteen kokonaiskustannuksia 12,9 %.

	Tuntihinta + 20 %	Teräksen hinta + 20 %	Elementtien hinta + 20 %
<b>Vertailurakenne</b>	5,3 %	5,0 %	-
<b>VE1 (PARMA)</b>	1,9 %	-	12,9 %
<b>VE2 (RUUKKI)</b>	4,2 %	10,8 %	-
<b>VE3 (ONTELO)</b>	2,1 %	-	10,3 %
<b>VE4 (TT-LAATTA)</b>	1,7 %	-	11,2 %
<b>VE5 (HEB550-KUORILAATTA)</b>	2,3 %	10,2 %	4,1 %

*Taulukko 14. Eri kustannusten nousun vaikutus ratkaisuiden kokonaiskustannuksiin.*

Paikallavalutekniikka on hioutunut tehokkuudeltaan optimaaliseksi. Siinä ei ole juuri näköpiirissä rakentamisajan nopeutumista jo yksin siitä syystä, että työntekijätunteja ja toisistaan riippuvia tehtäviä suuri on määrä. Vaihtoehtoisten rakenteiden osalta työsaavutusten arviointi maanalaisessa työkohteessa on hiukan epävarmaa. Todellinen työsaavutus nähdään vasta rakentamisvaiheessa ja työtekniikassa tapahtuu suurella todennäköisyydellä hioutumista tehokkaammaksi, kuten tapahtuu aina uutta toimintatapaa käyttöönotettaessa.

Elementtiasennuksen työsaavutus on myös herkkyydestarkastelun kannalta kriittinen. Tutkimuksessa asennuksen työmenekki on arvioitu parhaalla mahdollisella tarkkuudella. Asennuksen työsaavutus voi olla pienempi, mutta se voi toki myös olla suurempi, jolloin ajallisen edun tuoma kustannussäästö pienenee. P-Hämpin kokoisessa rakennushankkeessa aikasidonnaisten kustannusten säästö viikossa on noin 40 000 euroa. Näin ollen elementtiasennuksen työsaavutuksen ollessa 20 % hitaampaa, menettää se nopeammasta rakentamisajasta saamansa edun suhteessa paikallavalettuun rakenteeseen.



## 7 TULOKSET

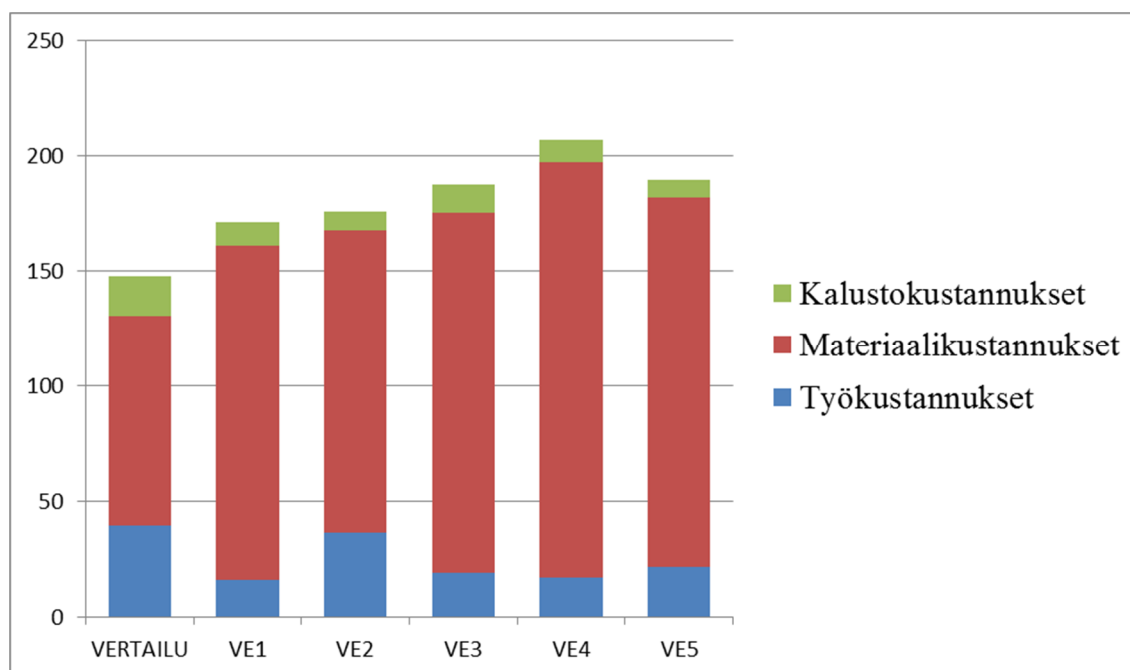
### 7.1 Ajallisten ja taloudellisten tulosten vertailu

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että elementtirakentaminen on myös maanalaisissa tiloissa paikallavalutekniikkaa nopeampi rakentamistapa. Parma Oy:n jännebetonipalkki-ripalaattaratkaisu on rakentamiskustannuksilta lähimpänä vertailurakennetta, Parman ratkaisun ollessa 15,8 % vertailurakennetta kalliimpi. Ruukki Constructionin ratkaisu on 18,7 % vertailurakennetta kalliimpi. Ratkaisuiden ajalliset ja kustannusvertailut on esitetty taulukossa 14. Taulukon korjatussa hinnassa on huomioitu kallioprofiilin muutoksesta aiheutuvat kustannukset.

	Ajallinen vertailu		Kustannusvertailu			
	Läpimenoaika (tv)	Työtehotuntia (tth)	€/välipohjaneliö	Työmaan käyttö- ja yhteiskustannukset (€/m2)	Muut kustannukset (€/m2)	Korjattu välipohjaneliöhinta
<b>Vertailurakenne</b>	38 + 5	3390	148 (183)	-	-	148
<b>VE1 (PARMA)</b>	31	1533	171 (216)	-26,3	2,3	147,0
<b>VE2 (RUUKKI)</b>	34	2114	175,5	-20,6	1,2 (8,4)	156,1
<b>VE3 (ONTELO)</b>	33	2114	187,1	-26,3	6,9	162,0
<b>VE4 (TT-LAATTA)</b>	33	1711	206,6	-24,4	6,9	183,4
<b>VE5 (HEB550+KL)</b>	33	2006	189	-20,6	1,1	169,6

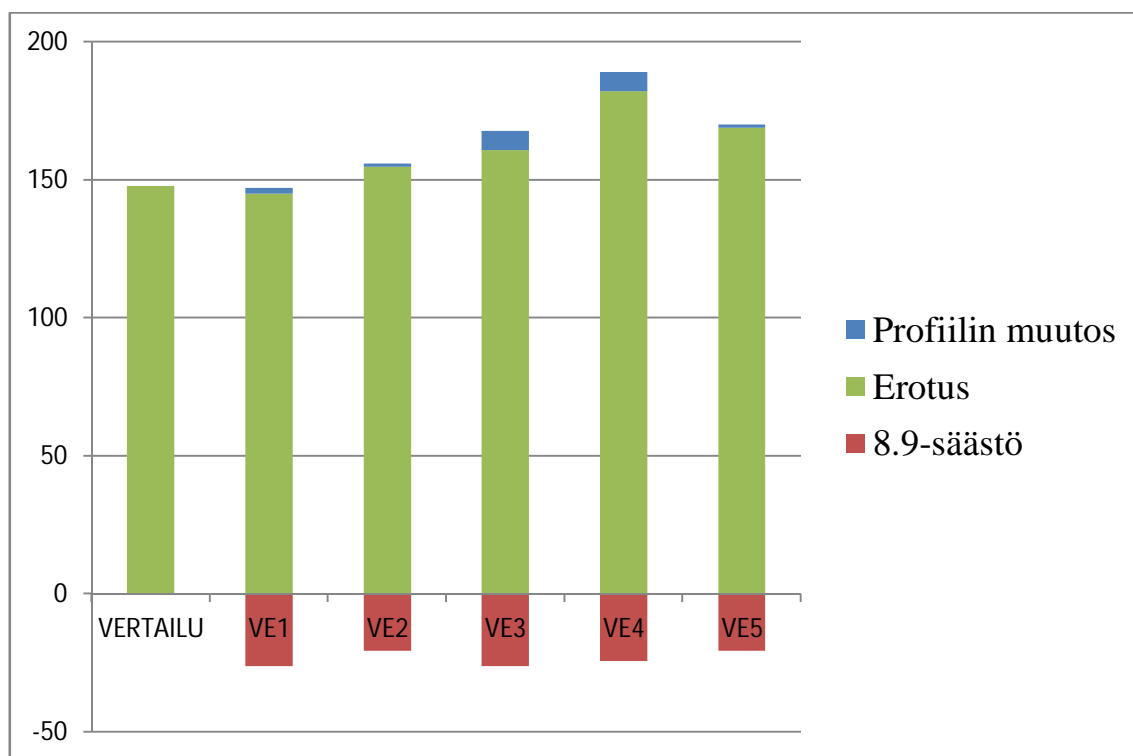
Taulukko 15. Ajalliset ja kustannusvertailut

Alla olevasta taulukosta nähdään rakennustekniset kustannukset eri rakenteiden osalta, kalusto-, materiaali- ja työkustannukset eroteltuna.



Taulukko 16. Rakennusteknisten kustannusten vertailu

Ajallisesti kaikki vaihtoehtoratkaisut ovat vertailurakennetta nopeampia. Aikasidonnaisista kustannuksista saatu säästö eri rakenteiden osalta on kuvattu taulukossa 16. Nähdään, että aikasidonnaisista kustannuksista saatu kustannussäästö saa Parma Oy:n ratkaisusta vertailurakennetta hieman halvemman. Kallioprofiilin muutoksesta aiheutuvat kustannukset ovat kuvattu myös taulukossa.



*Taulukko 17. Eri rakenneratkaisuiden rakentamiskustannukset aikasidonnaiset kustannukset vähennettynä.*

Parman ratkaisu on puhtaasti rakennusteknisiltä kustannuksilta kilpailukykyisin ratkaisu vertailurakenteeseen nähden. Kaikki vaihtoehtoiset ratkaisut ovat ajallisesti suurin piirtein samalla tasolla, noin 25 % nopeampia paikallavalutekniikkaan verrattuna.

Parma Oy antoi tarjouksen suunnitteluratkaisun mukaisesta rakenteesta P-Hämpin kohteeseen. Parma Oy:n tarjoushinnan vertaaminen kohteessa toteutettuun Keski-Suomen Betonirakenne Oy:n toteutuneeseen kustannukseen osoittaa, että Ratu-menekein toteutettua kustannuslaskentaa voidaan pitää melko luotettavana. Todellisten kustannusten ja Ratu-menetelmällä laskettujen kustannusten vertaaminen antaa todellisille kustannuksille kolme prosenttiyksikköä korkeamman hinnan Parman ratkaisulle. On syytä muistaa, että Parma Oy:n hinnassa on suurella todennäköisyydellä enemmän riskivaraa kuin KSBR:n hinnassa.

## 7.2 QSE- tulosten vertailu

QSE-analyysin osalta Parman ratkaisu ei saa yhtä korkeita arvioita kuin Ruukin ratkaisu tai vertailurakenne, säilyvyyden ja olosuhdetekijöiden johdosta. Rakenteen jälkijännittäminen tuo rakenteeseen huomattavan paljon lisää säilyvyyttä. Rakennuskustannuksia jännittäminen lisää huomattavasti, mutta hyödyt ovat rakenteen koko elinkaarta ajatellen merkittävät. QSE-analyysin tulokset on koottu taulukkoon 17.

QSE-ANALYYSI	VERTAILU	VE1	VE2	VE3	VE4	VE5
<b>LAATU</b>	3,75	3,5	3,5	2,5	2,5	2,5
Vesitiiveys	++++	+++	++++	++	++	++
Liitokset	++++	+++	+++	+++	++	++
Työvaiheet	+++	++++	+++	++	+++	+++
Rakennusosat	+++	++++	++++	+++	+++	+++
<b>TYÖTURVALLISUUS</b>	2,25	3	2,25	2,5	3	2,25
Kompastuminen	++	+++	++	++	+++	++
Sinkoaminen	++	++++	++	++++	++++	+++
Puristuminen	+++	++	+++	++	++	++
Putoaminen	++	+++	++	++	+++	++
<b>YMPÄRISTÖ</b>	4,5	3,25	3	2,5	2,5	3,25
Työmaalogistiikka	++++	++	++++	+	+	+++
Työskentely	++++	+++	+++	++	++	+++
Ilmanlaatu	++++	++	+++	++	++	++
Paloturvallisuus	++++	++++	+++	++++	++++	++++
<b>Yhteensä</b>	10,5	9,75	8,75	7,5	8	8

Taulukko 18. QSE-analyysi tulokset.

Työturvallisuuden osalta eri ratkaisuille eroja tuo paikalla tehtävän työn määrä, mikä vaihtelee suuresti paikallavalamisen ja elementtiratkaisuista Parman vaihtoehdon välillä. Holvilla työskenneltäessä putoamissuojaus on paikallavalamisen suurin haaste, kuten myös elementti- ja teräsvaihtoehdoissa.

Elementtien asentamisessa työntekijän puristuminen on vakavin mahdollinen työtapaturma. Maan päällä elementtien asennuksessa nostettavat rakennusosat liikkuvat helpommin työntekijöiden yli kun taas maan alla elementtiasennus on huomattavasti tarkempaa ja nostot lyhyempiä, mikä voi olla työturvallisuuden kannalta parempi.

Eri töiden yhteensovittaminen Ruukin ratkaisussa voi osoittautua ongelmalliseksi. Samanaikaisesti kun liittolevy- ja runkoasennus etenee, on liittolevyjen tukeminen edettävä. Raudoitteiden, jännepunosten ja muiden holvin päälle tulevien rakennusmateriaalien logistiikan on toimittava sujuvasti.

Ympäristöolosuhteiden kannalta suurimmat erot tulevat logistiikasta ja työskentelystä ahtaissa tunneliolosuhteissa. Paikallavalamiselle tunneliolosuhteet eivät tuo merkittäviä lisähaasteita toisin kuin raskaiden elementtien asennukseen ja liikuttelemiseen. Ruukin teräsvaihto on olosuhdetekijät huomioiden lähimpänä vertailurakennetta. Myös eri rat-

kaisuissa tarvittava kalusto ja niiden tuottamat pakokaasut vaihtelevat eri ratkaisuiden välillä. Vertailurakenteen rakentamisvaiheessa pakokaasujen aiheuttamat ongelmat eivät ole niin merkittäviä kuin esimerkiksi elementtiratkaisuissa, joissa asennuksessa tarvitaan jopa kahta nosturiautoa.

### **7.3 Herkkyystarkastelun ja tuotannon häiriöherkkyiden tulokset**

Herkkyystarkastelun tuloksista nähdään, että ratkaisuista herkimpiä muutoksille ovat betonielementtivaihtoehdot. Elementtikustannusten osuus esimerkiksi Parma Oy:n ratkaisun kokonaiskustannuksista on 64,5 %, joten elementtien hinnan nousu reagoi voimakkaasti kokonaiskustannuksiin. Ruukin ratkaisussa teräsmateriaalien osuus kokonaiskustannuksista on myös merkittävä. Työkustannusten vaikutus ei saa eroja eri rakenneratkaisuiden välille. Nostokaluston työsaavutuksen muutos voi vaikuttaa vaihtoehtojen ratkaisuiden kokonaiskustannuksiin. Aikaisemmat tutkimukset elementtirakentamisen ja paikallavalamisen kestojen keskinäisestä suhteesta puoltaa tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia, elementtirakenteiden ollessa noin 25 % nopeampia.

Häiriöherkkyiden kannalta turvallisin ratkaisu on vertailurakenne. Ruukki Constructionin ratkaisu on vertailurakenteen jälkeen seuraavaksi varmin ratkaisu häiriöherkkyiden kannalta. Siinä rakennusosia ja materiaaleja saadaan tuotua määrällisesti paljon kerralla, kuten vertailurakenteessakin, mikä vaikuttaa eniten häiriöherkkyteen. Elementtiratkaisut ovat niiden toimituksista ja suuresta painosta johtuen häiriöherkempiä ratkaisuja.

## 8 POHDINTA

Tutkimuksen alussa Ruukin kanssa yhteistyössä tutkimme uutta rakennevaihtoehtoa pysäköintilaitoksen välipohjaratkaisuksi. Kehittely ei edennyt tällä erää pidemmälle, mutta jatkoa ajatellen uudella innovaatiolla voisi saada etua kilpailijoihin. Se voisi olla rakennetekninen innovaatio, ei niinkään työtekniikkaan liittyvä seikka. Uusi välipohjaratkaisu yhdessä yhteistyöyrityksen kanssa kehitelty, jota ei aikaisemmin ole pysäköintilaitosten välipohjassa käytetty. Tämä vaatisi taloudellisia panostuksia ja tahtotilaa, sekä rohkeutta.

Aikaisemmin ympäristöolosuhde näkökulmissa on huomioitu, että maanalainen pysäköintilaitos eroaa huomattavasti sääolosuhteiden ja kosteusolosuhteiden osalta maan pällisestä pysäköintilaitoksesta. Maan alla ympäröivän ilman kosteus ja lämpötila ovat ihanteelliset eivätkä talviolosuhteiden rasitukset koettele rakenteita yhtä voimakkaasti kuin maanpällisissä pysäköintilaitoksissa. Tämä tasoittaa eri rakenteiden välisiä tekniisiä ja tuotannollisia eroavaisuuksia verrattuna siihen, että rakenteet olisivat maanpällisissä pysäköintilaitoksissa.

Elementtirakenteisten pysäköintilaitosten pohjaratkaisussa on tehokkainta, että palkkilinjat olisivat mahdollisimman pitkiä, toisin sanoen useampi pysäköintirivi vierekkäin. Useampi vierekkäinen pysäköintilaiva nopeuttaa asennusta. Optimaalisin elementtirakenteinen ratkaisu olisi leveämpi kuin 1,5-laivainen, kuten P-Hämpin pysäköintilaitos on tutkittavasta kohtasta. Tämä taas ei kuitenkaan ole kalliorakenteen kannalta kustannustehokasta. Leveä jänneväli johtaa massiivisempiin kalliolujituksiin ja vie pysäköintitunnelin syvemmälle ja vaikuttaa näin kustannuksiin voimakkaasti. Myös kalliokaton toimivuuden kannalta leveä jänneväli ei ole optimaalisin. Leveän ja niin ikään monesti loivan kalliokaton vesitiiviys voi osoittautua vaikeaksi pitää toimivana. Pohjavesien ohjaaminen reunoille on tämän kaltaisessa rakenteessa vaikeaa. Kalliokattoon tulee helposti vesivuotoja, jotka aiheuttavat ajoneuvoille likahaittoja ja ovat visuaalisesti epäsiistien näköisiä. Elementtirakenteisen pysäköintilaitoksen kannalta on myös sitä tehokkaampaa mitä enemmän pysäköintitasoja on päällekkäin. Maan alla asennus nopeutuu, koska samasta asennuskohdasta voidaan asentaa useita elementtejä. Tämä ei myöskään aina ole optimaalisin muoto maanalaiselle pysäköintilaitokselle. Pysäköintilaitosten dimensioidot ovat hyvin tapauskohtaisia ja riippuvat paljon muun muassa ympäröivistä rakenteista ja kaavasta. Toisaalta joskus useampikerroksinen pysäköintilaitos voi olla tehokkain ja ainoa toimiva muoto maanalaiselle kalliopysäköinnille.

Kokonaiskustannusten kannalta on myös pohdittava tapauskohtaisesti onko järkevää rakentaa pysäköintitasoja yhteen tasoon kahteen eri tunneliin, vai yhteen tunneliin ja kahteen tasoon, kuten tässä tutkimuksessa tasot on sijoitettu. Näiden kahden vaihtoehdon valintaan vaikuttaa kuinka laajalle alueelle pysäköintitunnelit voidaan tai pitää sijoittaa. Myös yhteydet yläpuolisiin kiinteistöihin on huomioitava. Tunneliprofiilin leventäminen kasvattaa tunnelin nuolikorkeutta ja kalliokaton korkeutta, mikä johtaa pi-

dempiiin ajotunneleihin ja kuiluihin koska pysäköintitunnelin pohjataso tulee syvemmälle. Pysäköinnin asettaminen kahteen tasoon vie väistämättä pohjatasoa myös syvemmälle, jolloin ajotunnelien pituudet kasvavat. Lisäksi nuolikorkeuden kasvaminen johtaa turhaan tilaan pysäköintilaitoksessa, mikä aiheuttaa kustannuksia louhinnan, käytön ja pysäköintilaitoksen toiminnallisuuden osalta. Pysäköintilaitoksen sijoitteluun vaikuttaa voimakkaasti muun muassa liittymät muihin kiinteistöihin, kaavoitus ja kallion laatu.

Elementtiasennukseen, kuten myös paikallavalutekniikkaan liittyen holvilla työskentely on ongelmallista. Putoamissuojauksen hoitaminen siten, että se toimii mutta ei vaikeuta muuta työskentelyä, on vaikeaa. Maan alla rakentaessa taivaskoukku- menetelmä voisi olla toimiva ratkaisu putoamissuojauksen varmistamiseksi. Siinä valjaat on kiinnitetty tarraimella työntekijän yläpuolelle. Tunnelissa tarrain voidaan kiinnittää tunnelin kattoon asennettuun kiskoon, jolloin kulkeminen ei esty, eikä tarrain sotkeudu työvälineisiin eikä materiaaleihin. Lisäksi jo suunnitteluvaiheessa suunnittelijoiden on otettava putoamissuojaus huomioon. Elementtiratkaisuissa rakennusosiin tulee suunnitella kohdat, johon kaiteet voidaan kiinnittää helposti ja nopeasti ja ennen kaikkea niin, että ne turvaavat työskentelyä eivätkä vaaranna.

Tutkimuksen vertailurakenne jälkijännitetty paikallavalettu välipohja on loppuun asti viritetty ja optimoitu rakenne. Vaihtoehtoisissa ratkaisuissa on vertailurakenteeseen nähden kehittämispotentiaalia asennuksen kuten myös rakenteiden optimoinnin kannalta. Toisaalta paikallavalutekniikkaa voi soveltaa jälkijännitettynä myös muihin paikallavalettuihin välipohjaratkaisuihin pyrkien esimerkiksi vielä väljempään pilarijakoon.

Tutkimuksessa rakenteiden säilyvyyden kannalta oleellisin asia on rakenteille määrätty 100 vuoden suunnittelukäyttöikä, jota kaikilta rakenteilta vaadittiin. Tavoitellun suunnittelukäyttöiän saavuttamiseksi rakenteilta vaaditaan Betoninormien, By50, mukaan betonin koostumuksen ja ominaisuuksien osalta tietyt raja-arvot. On eri asia mitä rakenteiden toimittajat lupaavat sopimuksien ja vastuiden kannalta.

Henkilöautojen mittojen kasvaessa on myös pysäköintilaitosten ruutujen koon kasvettava. Pysäköintilaitokset, jotka on rakennettu 80- ja 90-luvuilla, ovat ahtaita ja näin ollen hankalia käytettävyyden kannalta. Pysäköintiruutujen koot ovat kasvaneet 80-luvulta jolloin ne olivat 2,4 metriä leveitä, kun nyt pysäköintiruutujen leveydet ovat lähes poikkeuksetta 2,6 jopa 2,7 metriä. Pysäköintilaitosten käytettävyyteen ja viihtyvyyteen kiinnitetään enemmän huomiota, tästä P-Hämppi on hyvä esimerkki.

Toiminnallinen palomitoitus sprinklaamalla on teräsrakenteissa kustannuksia huomattavasti pienentävä tapa verrattuna rakenteiden palosuojaamiseen pinnoittamalla tai kote-loimalla. Asennuksen sujuvuus on keskeisin vaikuttava tekijä kustannuksiin. Rakennusosien keveys sekä helppo ja nopea asentaminen ovat tärkeimmät yksittäiset kokonaiskustannuksiin vaikuttavat tekijät. Teräspalkki yhdistettynä liittolevyyn tai kuorilaattaan on optimaalisin rakenne maanalaiseen pysäköintilaitokseen, mutta kokonaiskustannuksiltaan se ei ole edullisin. Logistiikan kannalta on myös tehokasta, että rakennusosia

saadaan tuotua työmaalle suuria määriä kerrallaan. Tämä johtaa myös häiriöherkkyyden pienenemiseen kuljetusten osuuden pienentyessä.

Vallitseva rakentamistapa pysäköintilaitoksien välipohjarakenteissa on paikallavalettu jälkijännitetty rakenne. Suunnittelijat ja tilaajat suosivat normaalissa jaetussa urakassa paikallavalettua välipohjaa, jolloin tarjousvaiheessa on lähes mahdoton vaihtaa välipohjarakennetta. Urakkamuodossa, jossa suunnittelu ja toteutus kuuluu urakoitsijalle, on mahdollisuus tehdä välipohjarakenne vaihtoehtoisena välipohjarakenteena.

## 9 YHTEENVETO

### Johtopäätöksiä

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää löytyykö paikallavaletulle jälkijännitetylle välipohjarakenteelle maanalaisessa pysäköintilaitoksessa taloudellisesti ja aikataulullisesti kilpailukykyistä haastajaa. Tutkimuksen tavoitteenaseluun saatiin vastauksia. Kaikki vaihtoehtoiset ratkaisut ovat vertailurakennetta kalliimpia, mutta lyhyempi rakentamisaika tuo kustannussäästöjä aikasidonnaista kustannuksista, sillä välipohjarakenne on pysäköintilaitoshankkeen kriittisellä polulla. Tutkimus osoittaa, että kokonaistaloudellisesti Parman ratkaisu tuo kustannussäästöjä nopeamman rakennusajan johdosta. Aikasidonnaisten kustannusten pienenemisestä saatu kustannussäästö huomioiden kokonaiskustannukset pienenevät myös. Lyhyempi rakentamisaika tuo lisäarvoa myös asiakkaalle, koska tulot lähtevät nopeammin liikkeelle. Lisäksi nopeammasta läpiviennistä voi olla etua myös urakkatarjouskilpailussa. Näitä seikkoja on vaikea mitata taloudellisesti, mutta ne ovat merkityksellisiä ja otettava huomioon.

QSE-analyysin tuloksissa Parman ratkaisu jää vertailurakenteen pisteistä, kuten muutkin vaihtoehdot. Parman ratkaisun suurin ongelma on rakennusosien suuri paino ja sen tuomat haasteet rakentamiseen. QSE-analyysin tuloksien vaikutus rakenteen valintaan on huomioitava, mutta QSE-analyysin painoarvon määrittäminen on vaikeaa. Haasteet, jotka liittyvät vaihtoehtoihin rakenteisiin on kuitenkin otettava huomioon.

Suhdanteiden vaikutus eri rakennevaihtoehtojen keskinäiseen järjestykseen on myös huomioitava. Rakenteiden kokonaiskustannukset voivat muuttua merkittävästi eri suhdanteissa. Tutkimuksen tuloksia tarkastellessa on muistettava, että tutkimusmenetelmään liittyy jonkin verran epävarmuutta, koska vastaavaa hanketta ei ole toteutettu elementtirakenteisena maanalaisessa pysäköintilaitoksessa. Työmenekkien arviointi on tehty parasta mahdollista tietoa noudattaen. Tutkimuksessa mukana olleisiin rakenteisiin olen tyytyväinen ja uskon, että parhaimmat vaihtoehtoiset rakenteet olivat tutkimuksessa mukana lähtökohdat huomioiden. Tutkimuksen tuloksiin olen myös tyytyväinen, sillä tavoite saavutettiin. Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että elementtirakenteinen maanalainen pysäköintilaitos on nopeampi rakentaa kuin paikallavalumemetelmällä rakennettu. Työteknisiltä kustannuksilta kalliimpi rakentamistapa tuo aikasidonnaisten kustannusten säästön kautta etua vertailurakenteeseen ja on kokonaiskustannuksiltaan vertailurakennetta jopa hieman halvempi.

Jo tutkimukseen lähdetäessä tiedettiin maanalaisessa pysäköintilaitoksessa haasteeksi nostokaluston käyttö ja logistiikka. Ero maan päällä rakentamiseen on suuri. Nostokaluston käytön haasteet korostuvat mitä painavampi yksittäinen rakennusosa on. Nostokalustoa ahtaisiin tiloihin löytyy ja asennus onnistuu, mutta kustannukset nousevat asennuksen hitaudesta johtuen ja toisaalta nostokaluston korkeista kustannuksista. Nostokaluston kustannukset eivät kuitenkaan ole merkittävin kustannuserä elementtiratkai-



suissa, eikä se tuo merkittävästi lisää kustannuksia, kuten tutkimuksen alussa oli oletettava. Ruukin teräspalkki- liittolevy – ratkaisu ei kokonaiskustannuksilta ole yhtä edullinen kuin Parman ratkaisu, mutta rakennusosien keveyden ja pienen häiriöherkkyyden johdosta se sopii paremmin maanalaisiin pysäköintilaitoksiin.

Tutkimuksessa mukana olleita rakenteita on syytä jatkokehittää tai ottaa jo nyt mukaan suunnitteluprosessiin uusissa hankkeissa. Uuden rakenteen tuominen markkinoille ja mukaan suunnitteluun lienee helpoiten mahdollista kvr-hankkeessa, jossa suunnittelu ja toteutus kuuluvat urakoitsijalle. Näin urakoitsija voi hankkeen alkuvaiheessa ottaa huomioon välipohjavaihtoehdot, joita hankkeessa voi käyttää ja optimoida suunnitelmia ja koko pysäköintilaitoksen dimensiota siten, että ne palvelevat parhaiten rakennetta. Tai kääntäen voidaan valita parhaiten sopiva rakenne kyseiseen kohteeseen. Ehdotukseni on, että uutta rakennetta testataan aluksi pilottikohteessa, jossa rakenteeseen suunnittelun ja toteutuksen kannalta oleelliset asiat tulee testattua. Toinen vaihtoehto on ottaa betonielementtivaihtoehto (Parma Oy) mukaan suunnitteluun jo sellaisenaan. Vaati rohkeutta niin rakennuttajalta, urakoitsijalta kuin välipohjarakenteen suunnittelijalta ja toimittajalta, jotta uusi rakenne tulee käyttöön ja osaksi pysäköintilaitosten välipohjavali-koimaa maanalaisissa kohteissa.

Yleinen käsitys, että elementtirakentaminen on paikallavalamista kalliimpi, mutta nopeampi tuotantotekniikka, toteutuu myös tässä tutkimuksessa. Aikasidonnaisten kustannusten kautta tulevan säästön johdosta rakenneratkaisuiden kustannusvertailu asettaa rakenteet hyvin lähelle toisiaan.

Elementtirakentamisen ja paikallavalu rakentamisen häiriöherkkyys on merkityksellinen seikka vertailtaessa eri rakenteita keskenään. Paikallavalaminen on vähiten häiriöherkkä tuotantotekniikka ja elementtirakentaminen eniten. Teräspalkki-liittolevyrakenne on keveiden rakennusosien johdosta näiden kahden muun tuotantotekniikan välissä häiriöherkkydessä. Keveitä rakennusosia voidaan kuljettaa työmaalle suuret määrät kerralla ja niiden liikuttaminen ja asentaminen on näin ollen myös helpompaa. Rakenteiden esteettisyys on myös huomion arvoinen näkökulma vertailtaessa rakenteita. Loppukäyttäjien viihtyvyys ja tilan käytettävyys ovat asioita, jotka pitää ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa.

## LÄHTEET

Aarnio, M. 2005. Rakenteellinen paloturvallisuus. Suomen rakennusinsinöörien liitto. Helsinki. 178 s.

Aho, O. 2008. Elementtirakenteinen pysäköintilaitos. Betoni- lehti 3/2008. [WWW]. [viitattu 23.4.2012] Saatavissa: <http://www.betoni.com/betoni-lehti/arkisto/2008-3>

Aho, T., Vuorinen, P. & Vuori, M., 2005, Paikallavalettu jälkijännitetty pysäköintirakennus, Kestävä kivitalo projekti. Suomen Betoni Oy. 2.painos

Chrest, A., Smith, M., Bhuyan, S., Iqbal. & Monahan, D. 2004. Parking structures, planning, design, construction, maintenance and repair. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts. 3.painos

Corus Construction & Industrial, 2004. Steel-framed car parks Saatavissa: [http://www.tatasteelconstruction.com/file\\_source/StaticFiles/Construction/Library/Steel%20Framed%20Car%20Parks%20PDF.pdf](http://www.tatasteelconstruction.com/file_source/StaticFiles/Construction/Library/Steel%20Framed%20Car%20Parks%20PDF.pdf)

Horko, M. 2010. Pysäköintitalon välipohjan suunnittelu ja kehitystyö. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan koulutusohjelma. Espoo.

Kenward, J et al. 2002. Design recommendations for multi-storey and underground car parks, The Institution of Structural Engineers. Lontoo. 3.painos

Kivimäki, C., Koski, H., Koskenvesa, A. & Mäki, T. 2010. Talonrakentamisen tuotantotekniikka. Rakennustieto Oy.

Kivistö, J. 2012. Luentokalvot. Tampereen teknillinen yliopisto.

[www.elementtisuunnittelu.fi](http://www.elementtisuunnittelu.fi)

Koskenvesa, A., Mäki, T. & Sahlstedt, S. 2008. Rakennustöiden laatu 2009. Tampere, Rakennustieto Oy. 9.uudistettu painos.

Koskenvesa, A., Mäki, T. & Palomäki, J. 2010. Rakentamisen tehtäväsuunnittelu. Rakennustieto Oy.

Koskenvesa, A. & Sahlstedt, S. 2011. Rakennushankkeen ajallinen suunnittelu ja ohjaus. Rakennustieto Oy. 144 s.

Koskenvesa, A. & Mäki, T., 2007. Aikataulukirja 2008. Rakennustieto Oy. Jyväskylä. 11.painos. 352 s.

Koskenvesa, A., Lindberg, R., Palolahti, T. & Penttilä, H. 2008. Rakennusosien kustannuksia. Rakennustieto Oy. Tampere.

Kuittinen, K. 1987. Pysäköintitalojen taloudellinen suunnittelu ja tuotantotekniikka, Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Maanmittaus- ja rakennustekniikan osasto, Espoo.

Mannari, P. 1992. Betonirungon tarjoamat mahdollisuudet. Aarnio, M., Anttila, K., Heikkonen, M., Janhunen, P., Lautso, K., Leino, J., Leino, O., Lepistö, T., Leppänen, H., Mannari, P., Nygren, M., Ruotsalainen, K & Witting, K. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL. s.81-88.

Mannonen, P. 2008. Paikallavaletut pysäköintilaitokset. Betoni- lehti 1/2008. [WWW]. [viitattu 20.4.2012]. Saatavissa: <http://www.betoni.com/betoni-lehti/arkisto/2008-1>

Outinen, J. 2009. Palotutkimuksen päivät 2009. [WWW]. [viitattu 30.4.2012] Saatavissa: <http://www.pelastusopisto.fi/pelastus/hankkeet/ptr/home.nsf/pages/1D8C43238DD054CBC225762400299690>

Palolahti, T., Koskenvesa, A., Lindberg, R. & Penttilä, H. 2007. Rakennusosien kustannuksia 2008. Rakennustieto Oy. 224 s.

Pennanen, T. & Kiiras, J. 1995. Liittorungon tuotannon suunnittelu. Betoniteollisuuden teknologiaohjelma. Teknillinen korkeakoulu. Rakentamistalouden laboratorio. 26 s.

Pekkala, V. 2003. Pysäköintilaitosten vauriot ja korjaaminen. Betoni- lehti 3/2003. [WWW]. [viitattu 20.4.2012] Saatavissa: <http://www.betoni.com/betoni-lehti/arkisto/2003-3>

Pukki, J. 2004. Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu. Betoni- lehti 4/2004. [WWW]. [viitattu 24.4.2012] Saatavissa: <http://www.betoni.com/betoni-lehti/arkisto/2004-4>

Pysäköintilaitosten suunnittelu ja rakentaminen. 1992. RIL/ Suomen rakennusinsinöörien liitto. 159 s.

Simola, L. 2011. Pysäköintitalo oikeilla ratkaisilla – tehoa rakentamiseen, väljyyttä pysäköintiin. Betoni- lehti 1/2011. [WWW]. [viitattu 25.4.2012] Saatavissa: <http://www.betoni.com/betoni-lehti/arkisto/2011-1>

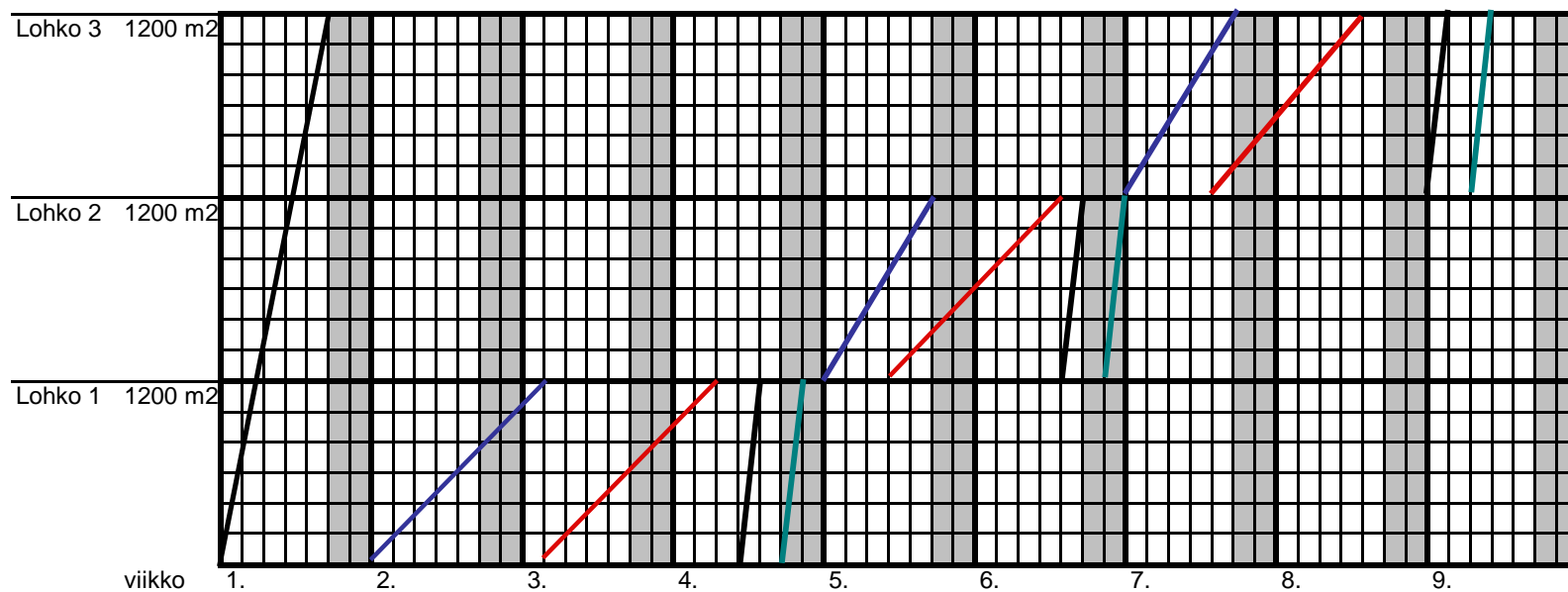
Suomen rakentamismääräyskokoelma E1. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet. Ympäristöministeriö 2002. [WWW]. [viitattu 18.6.2012] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=421080&lan=FI>

Talo 80-ryhmä, 1988. Yleisseloste Talo-80 nimikkeistöjärjestelmän mukaan. Rakentajain kustannus. 4.painos. 127 s.

Talo 90-ryhmä, 1994. Talo 90 : rakennuskustannusten laskentaohje : rakennustekniset työt. Rakennustieto Oy. 101 s.

[www.finnpark.fi](http://www.finnpark.fi) [viitattu 26.4.2012]

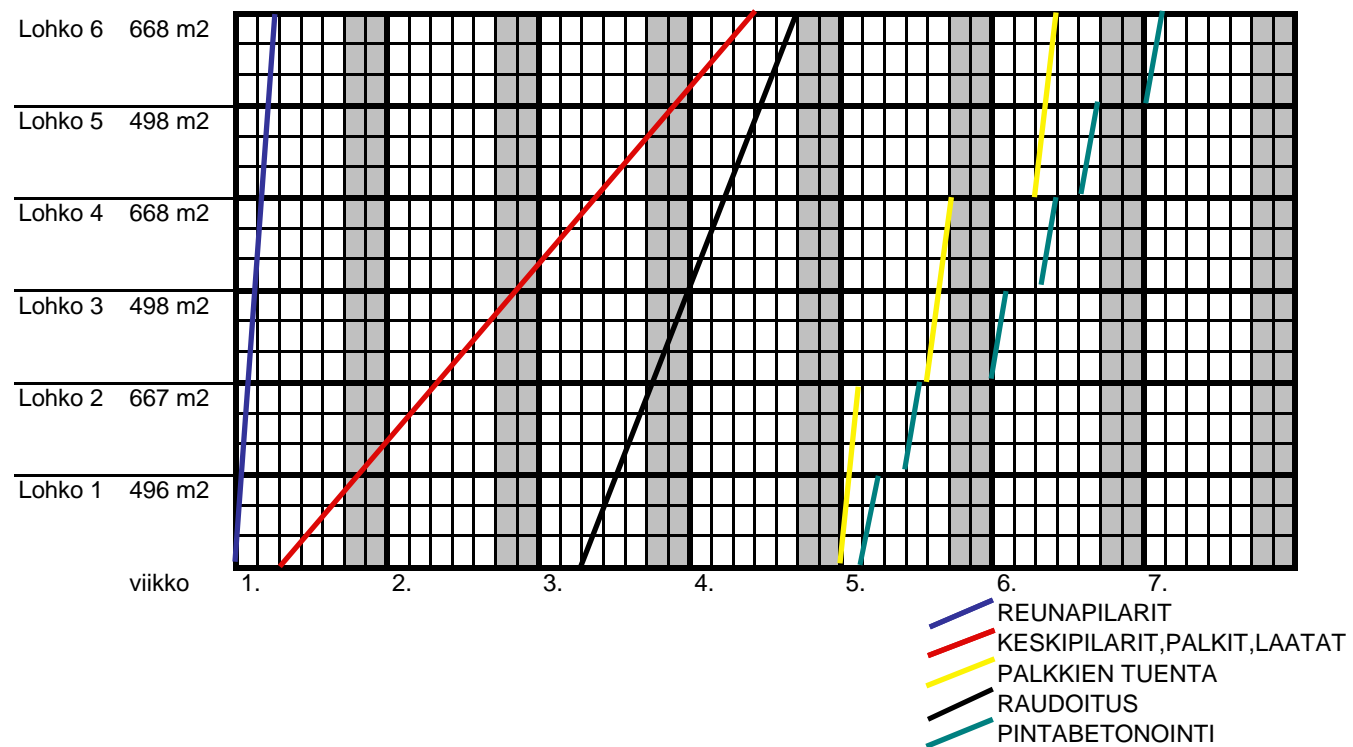
Walker, C. Parking structures guidelines. [WWW]. [viitattu 25.6.2012] Saatavissa: [http://parkandgo.org/media/parking\\_studies/appendI.pdf](http://parkandgo.org/media/parking_studies/appendI.pdf)



- MUOTTI
- RAUDOITUS JA JÄNNEPUNOKSET
- JÄNNEPUNOS
- BETONOINTI
- JÄNNITYS

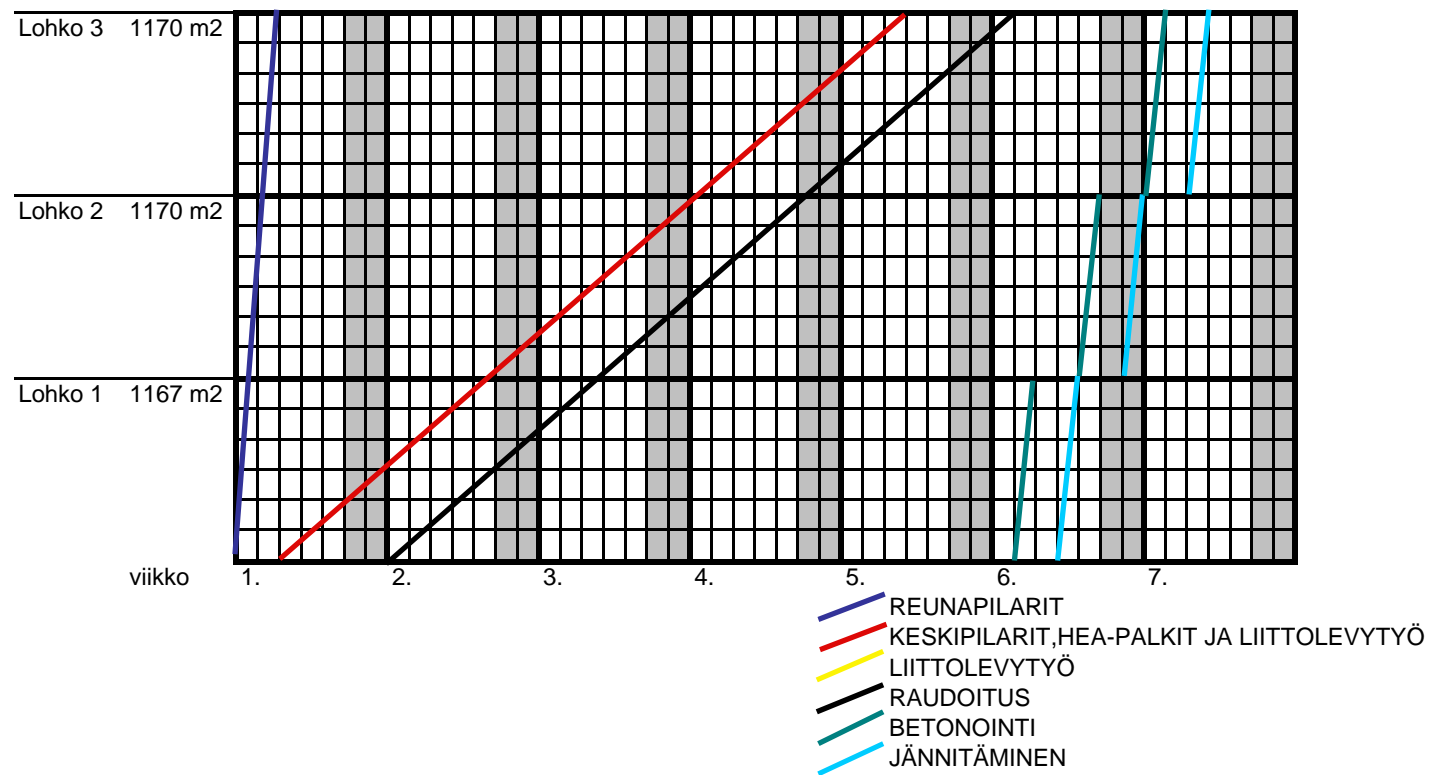
## Vaihtoehtorakenteen paikka-aika kaavio

### VE 1 (Parma) Jännebetonipalkki - ripalaatta



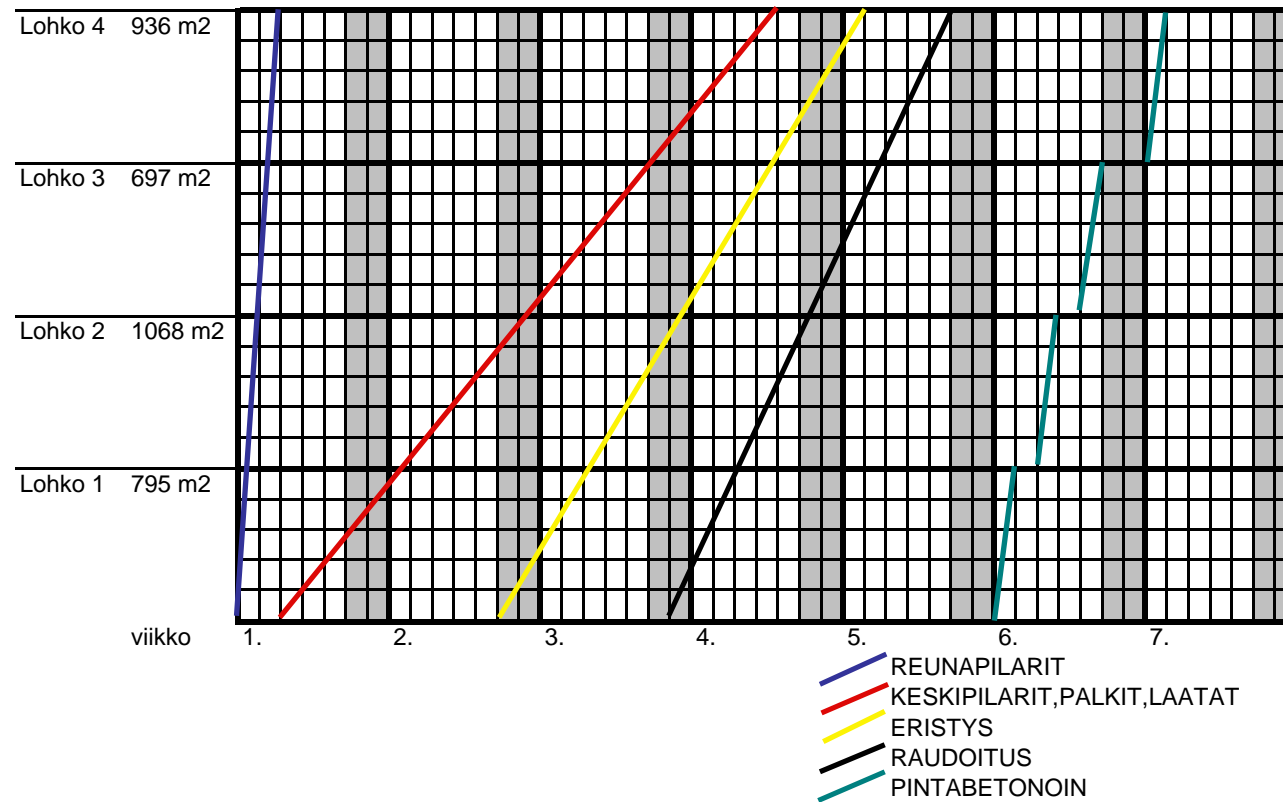
## Vaihtoehtorakenteen paikka-aikakaavio

### VE 2 (Ruukki)Teräspalkki - liittolevy, jännitetty laatta



## Vaihtoehtorakenteen paikka-aikakaavio

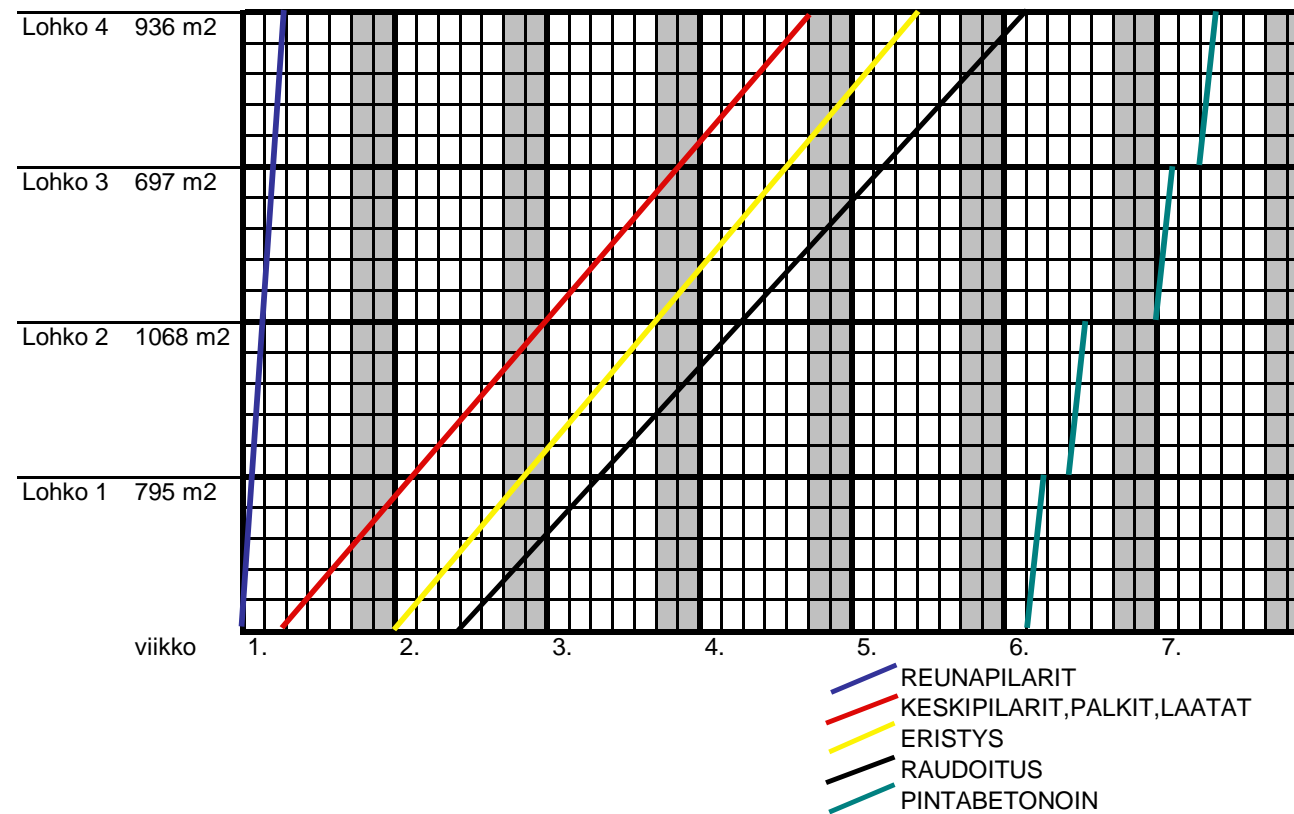
### VE 3 Leukapalkki - ontelolaatta





## Vaihtoehtorakenteen paikka-aikakaavio

### VE 4 Jännebetonipalkki - TT-laatta



## Vaihtoehtorakenteen paikka-aikakaavio

### VE 5 Teräspalkki - kuorilaatta

